

Tendencias recientes del NDVI en Andalucía: los límites del reverdecimiento

Recent NDVI trends in Andalusia (southern Spain):
the limits of vegetation greening

Oliver Gutiérrez Hernández 

olivergh@uma.es

Departamento de Geografía

Universidad de Málaga (España)

Resumen

La dinámica de la vegetación está controlada por factores climáticos y antropogénicos y su estudio facilita indicadores para el estudio multiescalar de tendencias ambientales. En este trabajo, se realizó un análisis de tendencia interanual del NDVI del periodo 2000–2020 en Andalucía basado en los productos de índice de vegetación MODIS. Los principales resultados muestran: 1) una tendencia significativa (p -valor $< 0,05$) del NDVI (mediana anual) en el 42 % del área de estudio, dentro de la cual el 95,5 % fue positiva; 2) una tendencia significativa (p -valor $< 0,05$) del NDVI (máximo anual) en el 44,1 % del área de estudio, dentro de la cual el 93,1 % fue positiva; y, 3) una tendencia significativa (p -valor $< 0,05$) del NDVI (mínimo anual) en el 64,9 % del área de estudio, dentro de la cual el 98,4 % fue positiva. Estos resultados evidencian un proceso de reverdecimiento. Esta tendencia se encontró tanto en cubiertas agrarias como en cubiertas forestales, aunque fue especialmente relevante en determinadas clases de ocupación del suelo: olivar y frutales; y, matorrales esclerófilos con arbolado disperso y bosques. Los resultados sugieren la importancia de los factores antropogénicos y su posible interacción con el cambio climático, al tiempo que avisan sobre los límites del reverdecimiento.

Palabras clave: teledetección; dinámica de la vegetación; Mann-Kendall.

Abstract

Climate and anthropogenic factors control vegetation dynamics, and its study provides indicators to address the multi-scale analysis of environmental trends. In this article, an inter-annual analysis of NDVI 2000-2020 trends in Andalusia was conducted using the MODIS Vegetation Index Products. The main findings show: 1) the annual median NDVI showed a significant trend (p -value <0.05) in 42% of the study area, with significant increasing trends of 95.5%; 2) the annual median NDVI showed a significant trend (p -value <0.05) in 44.1% of the study area, with significant increasing trends of 93.1%; and, 3) the annual median NDVI showed a significant trend (p -value <0.05) in 64.9% of the study area, with significant increasing trends of 98.4%. This greening trend was found both in agricultural and forest covers. However, this greening was more relevant in some land cover types: olive groves and fruit trees; and sclerophyll scrubs with scattered trees and forests. The findings suggest the importance of anthropogenic factors and how they interact with climate change, while also cautioning against the limitations of vegetation greening.

Keywords: remote sensing; vegetation dynamics; Mann-Kendall.

1 Introducción

Los fenómenos biológicos se proyectan través de una interfaz, no fácil de limitar, entre la litosfera, la atmósfera y las hidrosfera (Rubio Recio, 1992). La interfaz de la vida, cuya delimitación ha representado una de las preocupaciones fundamentales de la geografía moderna desde sus orígenes (Humboldt, 1805), es el campo de la biogeografía en el contexto de la geografía física (Ferrerías Chasco & Fidalgo Hijano, 1991; Meaza et al., 2000; Strahler, 2013). A esta interfaz se denomina biosfera: la expresión espacial y funcional de la vida en el planeta.

La geografía —como disciplina— selecciona aquellos fenómenos biológicos más perceptibles en la escala de paisaje (Rubio Recio, 1989; Sala & Batalla, 1999), aquellos que expresan una impronta dominante en la organización del espacio geográfico. Ello se concreta, por ejemplo, en el estudio de la distribución y dinámica de la vegetación y la ordenación del paisaje vegetal, campo que ha sido abordado desde aproximaciones muy diversas en su escala y metodología (Cámara Artigas & Díaz del Olmo, 2013; Franklin, 1995; Olson et al., 2001; Rubio Recio, 1989).

En el marco de la teledetección y la monitorización de procesos ambientales, el estudio de la vegetación ocupa una posición central (Jones & Vaughan, 2010). La observación remota de las cubiertas vegetales se apoya en el contraste que presenta la vegetación vigorosa en las distintas bandas del espectro electromagnético, especialmente en el visible (alta absorción) y el infrarrojo (alta reflectividad), de modo que, cuanto mayor sea el contraste entre estas regiones, mayor será la cobertura vegetal y/o el vigor de la vegetación, y más clara su discriminación frente a otro tipo de cubiertas (Chuvienco, 2008). Este es el fundamento de los índices de vegetación, que, en la práctica, y específicamente aquellos basados en las bandas rojo e infrarrojo cercano, representan una medida de la abundancia de clorofila y la absorción de energía (Myneni et al., 1995).

Los índices de vegetación constituyen una de las herramientas más destacadas en el estudio de la dinámica de la vegetación (Roerink et al., 2003). El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, de *Normalized Difference Vegetation Index*) es el más utilizado (Huang et al., 2021). Bajo la perspectiva de la observación remota, la expresión *dinámica de la vegetación* (*vegetation dynamics*, término empleado en la literatura científica escrita en lengua inglesa) se refiere, en sentido estricto, a la monitorización espaciotemporal del comportamiento espectral de la actividad vegetal sobre la superficie terrestre (Eamus et al., 2016). La dinámica de la vegetación puede estar influenciada por factores ambientales (e.g. el clima) y/o antropogénicos (e. g. prácticas de gestión) y, en cualquier caso, su estudio a través de índices de vegetación opera como un *proxy* para detectar cambios ambientales (Pettorelli et al., 2005). De hecho, uno de los frentes de investigación más activos en el campo de las geociencias, es el monitoreo de la superficie terrestre a través de imágenes de satélite, debido a la gran cantidad de datos abiertos procedentes de programas de observación internacionales (Clarivate Analytics, 2021).

La relación entre cambio global y dinámica de la vegetación se ha explorado ampliamente en la literatura científica (Bogaert et al., 2002; Cleland et al., 2007; de Jong et al., 2011; Eastman et al., 2013; Goetz et al., 2005; Ichii et al., 2002; Lucht et al., 2002; Pettorelli et al., 2005; Schut et al., 2015; Slayback et al., 2003; Tucker et al., 2001; Xiao & Moody, 2004; Yang et al., 2019; Zhou et al., 2001; Zhu et al., 2016). Zhu et al. (2016) encontraron un aumento global del *Índice de Área Foliar* (LAI, *Leaf Area Index*) y, a juicio de los autores, el 70 % de la tendencia observada podría estar explicada por la fertilización global generada por el CO₂. En relación con el calentamiento global, se ha observado un reverdecimiento en latitudes altas, debido al incremento de la temperatura, factor que permite temporadas de crecimiento más prolongadas (Bogaert et al., 2002; Cleland et al., 2007; Ichii et al., 2002; Lucht et al., 2002; Tucker et al.,

2001; Zhou et al., 2001). Por su parte, Yang et al. (2019) destacan el rol de las precipitaciones en las tendencias del NDVI del planeta. Otros factores ambientales se hallan presentes en tendencias observadas tanto en sentido positivo como negativo (Goetz et al., 2005; Slayback et al., 2003; Xiao & Moody, 2004), pero es difícil aislar la influencia genuina de estos factores sobre las tendencias del NDVI y cómo sus efectos evolucionan significativamente con el tiempo. Además de los citados factores ambientales, las actividades humanas, tales como los cambios en la ocupación del suelo, su fertilización, el riego, etc. también podrían tener un impacto significativo en las tendencias de reverdecimiento (Mueller et al., 2014; Neigh et al., 2008), tanto en bosques como en tierras de cultivo (Chen et al., 2019). Sin embargo, en la literatura científica internacional, se echa en falta un mayor número de estudios al respecto, sobre todo a escala regional, donde es necesario verificar el desigual comportamiento de estas tendencias.

El objetivo de la presente investigación consiste en analizar la dinámica de la vegetación con imágenes de satélite y, específicamente, identificar y cuantificar, a través de los productos de índice de vegetación MODIS, las tendencias interanuales del NDVI (mediana anual, máximo anual, mínimo anual) del periodo 2000–2020 en cubiertas agrícolas y forestales de la Comunidad Autónoma de Andalucía (sur de la península ibérica, España). Con ello, se pretende profundizar en el conocimiento integrado de la dinámica de la vegetación a escala regional y, además, discutir acerca de la posible influencia de las actividades humanas, así como las posibles repercusiones derivadas de la problemática ambiental en un contexto de cambio global.

2 Material y métodos

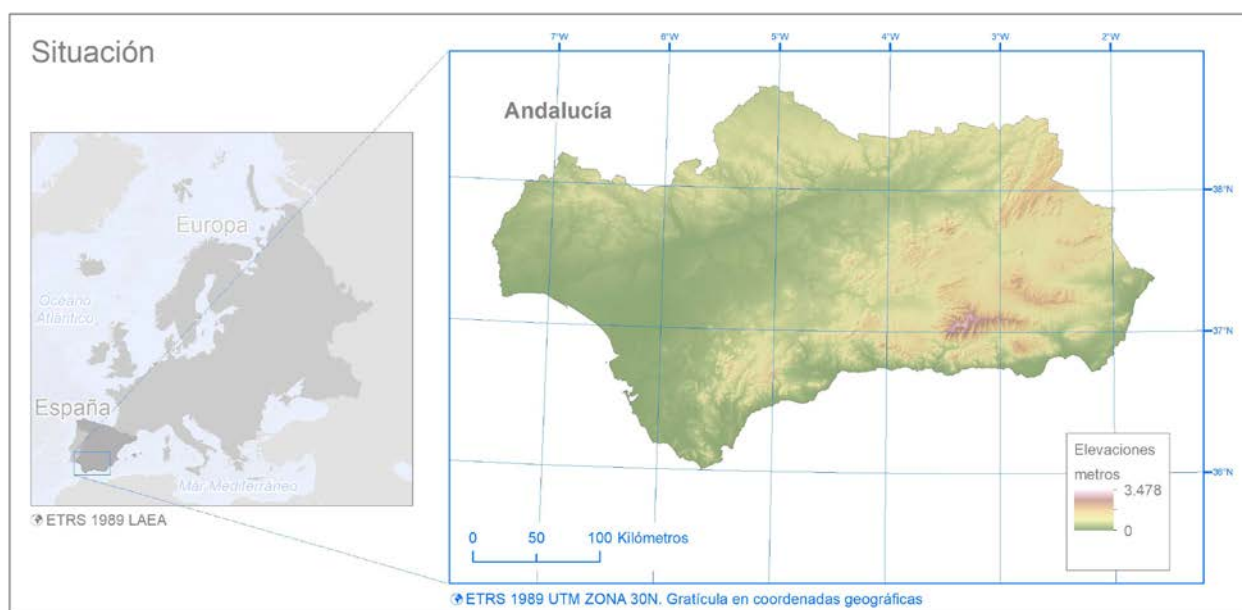
2.1 Área de estudio

El área de estudio (Figura 1) es el conjunto de la Comunidad Autónoma de Andalucía (España). El territorio andaluz se localiza en el sector meridional de las latitudes medias, entre 36°00'04" (extremo sur) y 38°43'48" (extremo norte) de latitud norte, y los 7°31'17" (extremo oeste) y 1°37'34" (extremo este) de longitud oeste (López Ontiveros, 2003a), por lo que constituye la región más meridional de la península ibérica —la más occidental de las penínsulas de Eurasia— y representa a su vez, el sector más meridional de la Europa continental (López Palomeque & Plaza Gutiérrez, 2019).

Andalucía comprende una superficie de 87 607 km² (estimada con una rejilla de 250 m²), cifra que la sitúa como la segunda región más extensa de España, con una superficie que, considerando exclusivamente el contexto europeo, supera la de países como Austria o República

Checa, duplica la de Países Bajos o Dinamarca, o se aproxima a la de Portugal. Por tanto, cabe destacar la amplitud del espacio interior del territorio andaluz, con unas distancias máximas en sentido este-oeste de 522,5 km y en sentido norte-sur de 306,5 km. La mitad meridional del perímetro de la región está delimitada las aguas marítimas: el océano Atlántico, al oeste del estrecho de Gibraltar, y el mar Mediterráneo, al este del citado estrecho, hito geográfico que también separa el continente europeo del africano. Por tanto, Andalucía representa un amplio territorio fronterizo en el que convergen diferentes confines geográficos y ambientales (López Ontiveros, 2003a, 2003b, 2003c).

Figura 1. Área de estudio



Fuente: elaboración propia a partir de DERA

El relieve andaluz se halla fuertemente condicionado por la estructura geológica de la región y su traza proyecta sobre el mapa una letra "Z" inclinada (Moreira Madueño, 2003), donde el escalón de Sierra Morena, con sus formas acolinadas, pesadas y antiguas, establece el segmento más septentrional; la depresión del Guadalquivir, como la diagonal que atraviesa la región por su zona axial y forma una extensa planicie con depósitos no consolidados; y, las cordilleras Béticas, como el segmento más meridional y agreste del conjunto, y donde se alcanzan las máximas elevaciones de la península ibérica, con 3478 metros de altitud en el pico Mulhacén de Sierra Nevada.

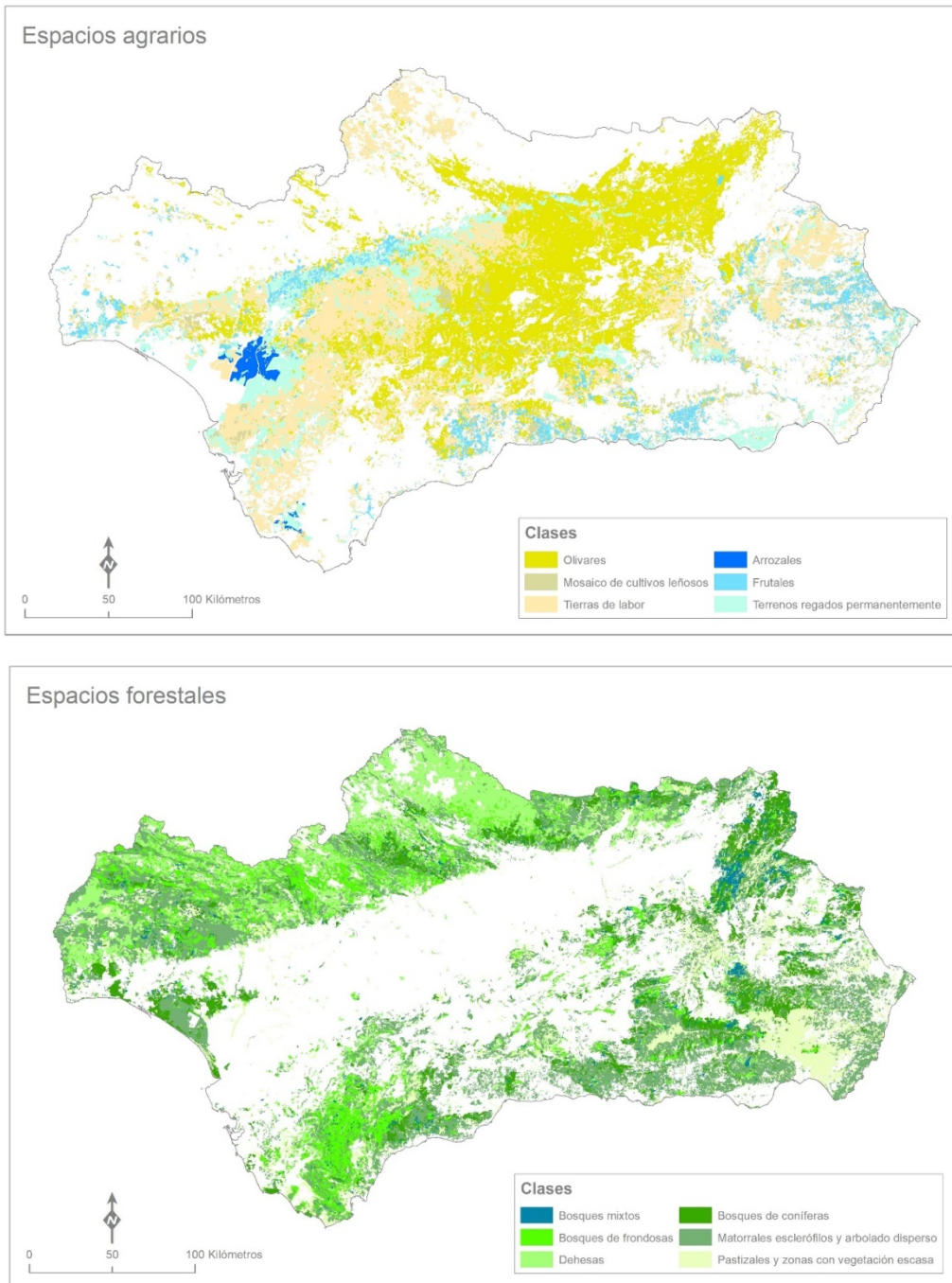
El ámbito climático de Andalucía se halla determinado, en primer término, por su posición geográfica. La región se ubica en una zona de transición entre los climas de latitudes medias y los climas tropicales y ocupa la fachada occidental del continente, factores que en estas latitudes

se traducen bajo el efecto del balanceo de la subsidencia subtropical y la alternancia de un marcado periodo muy seco y caluroso y, otro periodo, no tan marcado, pero de carácter húmedo y templado (Pita López, 2003). La impronta del relieve y su interacción con las masas de aire, que con distinta dirección y procedencia arriban a la región, generan un mosaico ambiental que multiplica las variedades climáticas (costera, de interior, de montaña, alta montaña), pero siempre bajo el condicionante de un verano marcadamente seco y caluroso y la intermitencia de una sequía interanual que se manifiesta en las estaciones potencialmente lluviosas (Gómez-Zotano et al., 2015).

La naturaleza del sustrato litológico y la impronta del relieve son los principales condicionantes de la ocupación del suelo. La primera consecuencia es que la región se halla dividida en dos grandes ámbitos paisajísticos: los espacios agrarios y los espacios forestales (Figura 2). Pero esta dicotomía paisajística no opone un medio antropizado frente a un medio natural, sino variantes de la acción transformadora del ser humano a lo largo de la historia, porque, en efecto, los espacios forestales del territorio andaluz también son el resultado —por acción u omisión— de la actividad humana frente a los condicionantes del medio y las coyunturas históricas (Valdés & Gil Sánchez, 1998). Los usos agrarios predominan en la depresión del Guadalquivir, las depresiones intramontañosas y la franja costera no urbanizada, incluyen cultivos herbáceos y leñosos, y contrastan los tradicionales cultivos de secano frente a unos regadíos cada vez más acaparadores de espacio (Naranjo Ramírez, 2003). Por su parte, los espacios forestales imperan en Sierra Morena y las cordilleras Béticas, con formaciones de quercíneas más frecuentes en la primera, mientras que las coníferas lo son más en las segundas (Araque Jiménez & Martínez, Sánchez, 2009).

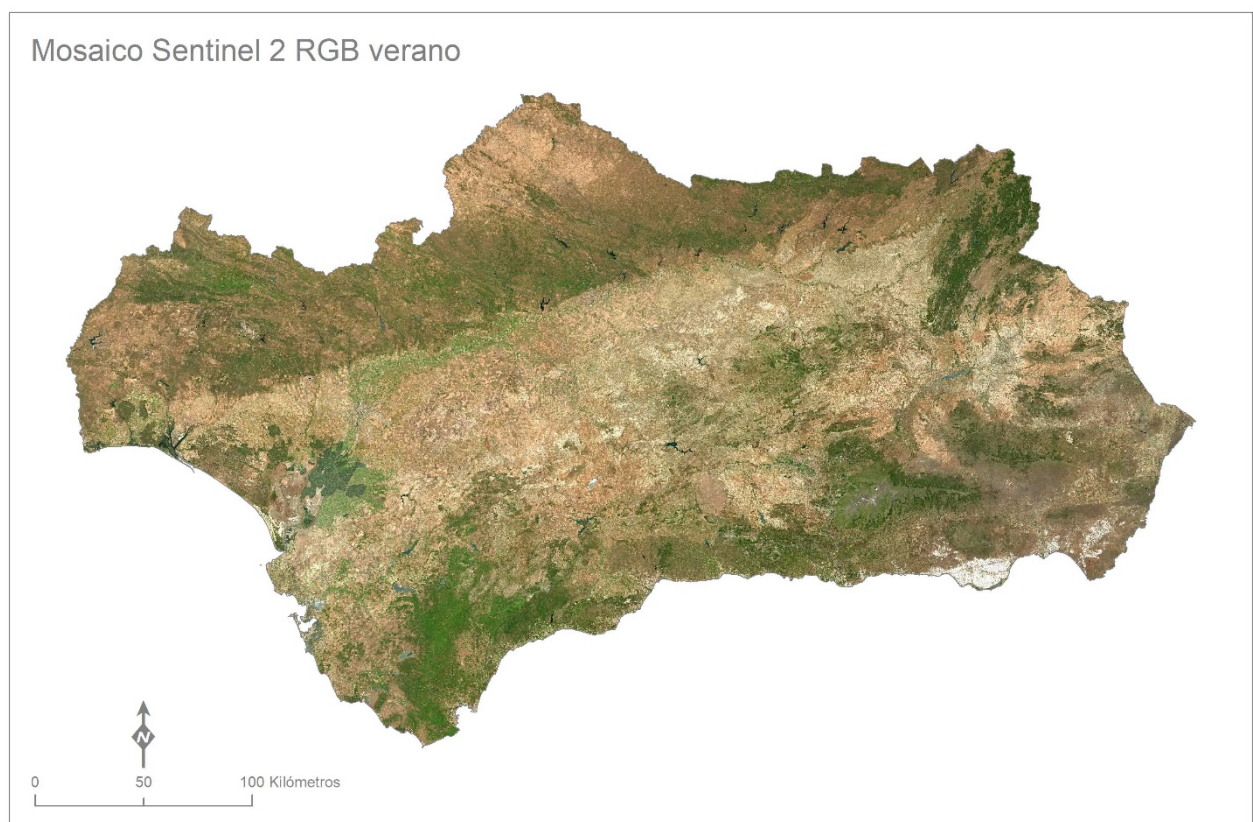
La actividad vegetal medra tanto en los espacios agrarios como en los forestales y proyecta unos contrastes espaciales y estacionales muy característicos (Figura 3). En la península ibérica, estos patrones fenológicos están determinados, fundamentalmente, la situación geográfica y, en el caso de la Comunidad Autónoma de Andalucía, se enmarcan en el contexto de la región mediterránea. Asimismo, los efectos que introduce el relieve sobre las temperaturas y las precipitaciones, y la naturaleza de la cobertura vegetal y los sistemas de explotación de la ocupación del suelo, condicionan la existencia de un variado mosaico de cubiertas vegetales con dinámicas y ciclos fenológicos diferenciados (Alcaraz-Segura et al., 2009; Alcaraz et al., 2006; Caparros-Santiago & Rodríguez-Galiano, 2020).

Figura 2. Ocupación del suelo: espacios agrarios y espacios forestales



Fuente: elaboración propia a partir de Corine Land Cover, IGN-CNIG & Copernicus

Figura 3. Mosaico de imágenes Sentinel 2



Fuente: elaboración propia a partir de IGN-CNIG & Copernicus

2.2 Metodología

En este apartado, se describe secuencialmente la metodología empleada, integrando la descripción de los datos utilizados, la explicación del flujo de trabajo y la selección de las herramientas empleadas en este trabajo; todo ello con objeto de facilitar la lectura, la interpretación y la replicabilidad de los resultados de la presente investigación.

- 1 Selección del producto de vegetación. Se trabajó con las imágenes del sensor Terra-MODIS, en concreto, el producto [MOD13Q1](#), donde cada imagen es obtenida a partir de la selección de los píxeles aceptables de un compuesto de 16 días (Didan, 2015; Mas, 2011). Los datos de la versión 6 de los índices de vegetación (MOD13Q1) del espectroradiómetro de imágenes de resolución moderada Terra (MODIS) se generan cada 16 días a una resolución espacial de 250 metros (m) como un producto de nivel 3. Los productos del nivel 3 son productos de valor agregado derivados de variables geofísicas a partir de los valores corregidos de reflectancia. En algunos casos, incorporan un remuestreo de las bandas originales y, en todos los casos, están basado en una composición basada en un periodo de registro de 1, 8, 16 o 30 días. En el producto seleccionado, el algoritmo selecciona el mejor valor de píxel disponible de todas las adquisiciones del período de 16 días, y se basa en el procedimiento de máximo valor de la composición, que minimiza las distorsiones y mejora las imágenes en el marco de series temporales (Holben, 1986). Por tanto, se trata de un producto basado en un estricto control de la calidad de los datos y que, al mismo tiempo, procede de un recurso público y accesible en la web.
- 2 Descarga de datos. Se realizó la descarga de las series anuales completas del citado producto elaborado por el [MODIS Science Team](#) (NASA), esto es, desde los años 2000 a 2020 operando con la interfaz informática del entorno de análisis de datos R (R Core Team, 2021). Más específicamente, se utilizó paquete *MODISrsp* publicado por Busetto & Ranghetti (2016). Este paquete incluye funciones para programar tanto la descarga masiva de datos MODIS, como para definir los diferentes parámetros asociados con las imágenes descargadas: selección del sensor, cobertura temporal, cobertura espacial, resolución espacial, funciones de remuestreo, sistema de referencia de coordenadas, formato de los archivos, normalización escala de medida o metadatos.
- 3 Integración en Sistema de Información Geográfica. La resolución de los datos de entrada se estableció a través de una malla regular de 250 metros, con una cobertura para el conjunto del territorio de la Comunidad Autónoma de Andalucía (87 607 km²). Los datos georreferenciados se integraron en un Sistema de Información Geográfica multiplataforma (R

como SIG, *Terrset*, *ArcGIS*), donde se definió la misma región, máscara, resolución, alineación y codificación para todas las imágenes, y asimismo se proyectaron los datos usando el sistema de coordenadas UTM ETRS89 HUSO 30 ([EPSG: 25830](https://epsg.org/epsg/25830)).

- 4 Estimador de la actividad vegetal. Se utilizó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (Rouse et al., 1974) como base para estimar cuantitativamente la actividad vegetal a nivel de píxel y la dinámica de la vegetación en el contexto de la serie temporal. Este índice emplea dos bandas: infrarrojo e infrarrojo cercano. Además, como su nombre indica, el NDVI es un índice normalizado, por lo que sus valores oscilan entre 0 y 1. En la práctica, se ha convertido en un estándar para abordar este tipo de investigaciones (Anyamba & Tucker, 2005; Beck et al., 2006; Eamus et al., 2016; Pettorelli et al., 2005; Reddy & Prasad, 2018). Su formulación es la siguiente:

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

donde: ρ_{IRC} es reflectividad en el canal infrarrojo cercano; R es reflectividad en canal rojo.

- 5 Preprocesamiento de la serie temporal inicial. Con el fin de obtener una serie temporal completa y homogénea, válida para todo tipo de análisis estadísticos: 1) Se interpolaron los valores faltantes correspondientes a enero de 2000 a través del panel *Missing Data Interpolation* del módulo *Earth Trend Modeller* del software *Terrset* (Eastman, 2020, 2021), ya que las primeras imágenes disponibles del sensor Terra-MODIS son de febrero del año 2000; 2) Se corrigieron los píxeles con valores erróneos a través de una adaptación del procedimiento de *HANTS - Harmonic Analysis of Time Series* (Roerink et al., 2000). En total, se generaron 483 imágenes NDVI, 23 por cada año, basadas en el compuesto de 16 días y desde 2000 a 2020.
- 6 Diseño de la serie temporal definitiva. A partir de las imágenes obtenidas en el preprocesado de la serie temporal inicial, se estimó por cada unidad espacial (píxel) y temporal (año), los siguientes parámetros: NDVI mediana anual, NDVI máximo anual y NDVI mínimo anual. De modo que, finalmente, generaron tres series temporales anuales (2000–2020) compuestas por 21 imágenes cada una, con el fin obtener una triple visión de la dinámica de la vegetación basada en la mediana y en los momentos de máximo y mínimo vigor en cada unidad espacial.
- 7 Análisis de tendencia interanual. Con el fin de identificar la existencia de tendencias interanuales, se aplicó la prueba *Contextual Mann-Kendall* (CMK) (Neeti & Eastman, 2011). La

prueba *Mann-Kendall* es un estadístico no paramétrico que mide el grado en que una tendencia monótona aumenta o disminuye consistentemente en el tiempo (Kendall, 1975; Mann, 1945). Esta prueba está basada en el estimador de Theil–Sen, que calcula la pendiente entre pares de valores empleando la mediana (Sen, 1968; Theil, 1950). Éste es un estimador muy robusto frente a valores atípicos, por lo que también es adecuado para analizar series temporales cortas y ruidosas (Hoaglin et al., 2000). En una serie espaciotemporal basada en imágenes –como la analizada en la presente investigación–, todas las combinaciones de pares de valores a través del tiempo son evaluadas en cada píxel. La prueba *Contextual Mann-Kendall* (CMK) calcula la estadística de Mann-Kendall en cada píxel junto con sus 8 píxeles vecinos, y luego combina la información de estos nueve píxeles mientras corrige la autocorrelación tanto en el espacio como en el tiempo, proporcionando una evaluación contextual de la importancia de la tendencia. Entonces, si un píxel muestra una tendencia, pero sus vecinos no, la confianza en esa tendencia se reduce; pero si los vecinos de un píxel están experimentando tendencias similares, la confianza de esa tendencia aumenta. Por tanto, la técnica es muy eficaz para eliminar el ruido aleatorio y aplica un principio geográfico fundamental para la evaluación de la tendencia: se espera que las áreas cercanas en el espacio experimenten tendencias similares a lo largo del tiempo.

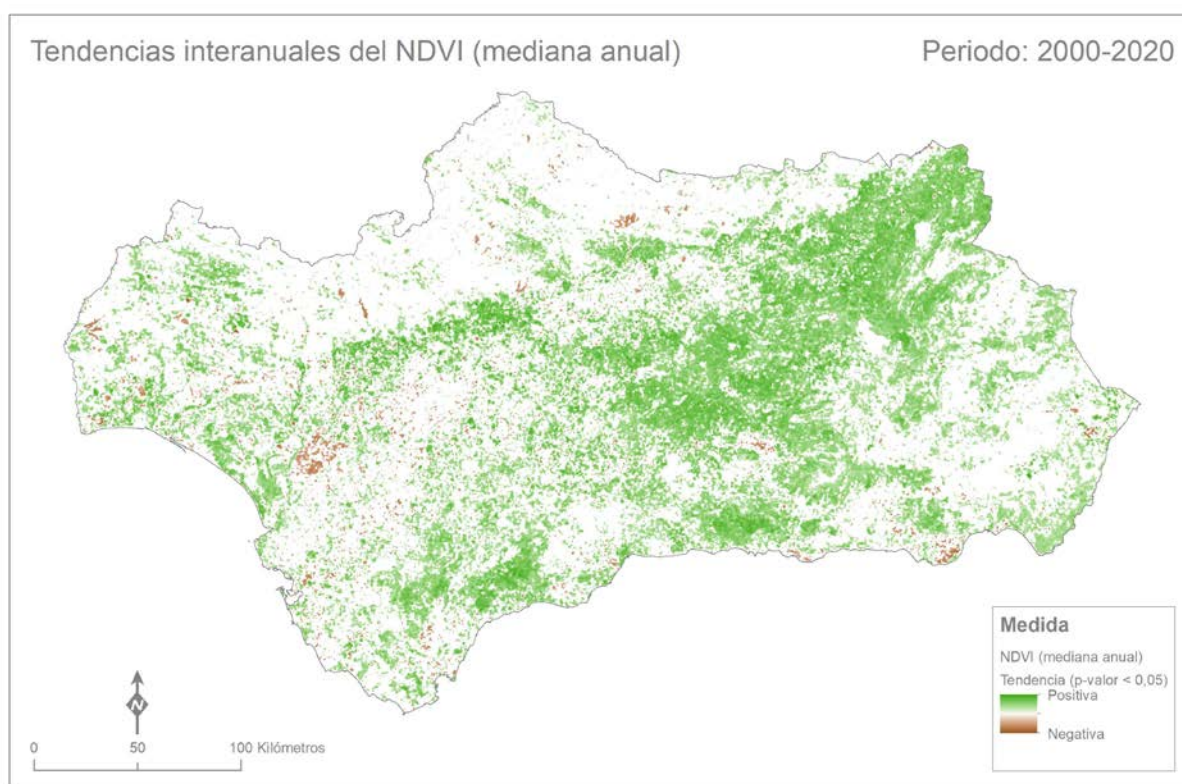
- 8 Representación espacial de la tendencia. Finalmente, las tendencias interanuales del NDVI en Andalucía son identificadas y representadas espacialmente en cada píxel por el signo (positivo, *greening* o reverdecimiento vs negativo, *browning* o empardecimiento), definido por las puntuaciones Z (*Z-score*) y la significación estadística (*p-valor* < 0,05) obtenidos mediante la aplicación de la prueba *Contextual Mann-Kendall* (CMK).
- 9 Por último, se utilizó el proyecto Corine Land Cover como referencia de la ocupación del suelo (IGN, 2018), con el fin de ofrecer información adicional sobre las tendencias del NDVI y su distribución según la ocupación del suelo. En este sentido, se presentó la ocupación del suelo de forma diferenciada tanto en espacios forestales como en espacios agrarios, que son los ámbitos donde se manifiesta en su mayor parte la actividad vegetal. Dado que el objetivo de este trabajo es ofrecer una visión general, la leyenda del Corine Land Cover se simplificó por agregación en seis clases de ocupación –las más representativas– por cada ámbito diferenciado. En los espacios agrarios se representaron las siguientes clases: olivares, mosaico de cultivos leñosos, tierras de labor, arrozales, frutales y terrenos regados permanentemente. En los espacios forestales se representaron las siguientes clases: bosques

mixtos, bosques de frondosas, dehesas, bosques de coníferas, matorrales esclerófilos y arbolado disperso y pastizales y zonas con vegetación escasa.

3 Resultados

Entre los años 2000 y 2020, el 42 % (36 835 Km²) del territorio de la Comunidad Autónoma de Andalucía mostró una tendencia del NDVI (mediana anual) estadísticamente significativa (p-valor <0,05), frente a un 58 % (50772 Km²) que no mostró una tendencia estadísticamente significativa (Figura 4). En el marco de las áreas donde se registró esta tendencia, el 95,5 % (35164 Km²) de la superficie experimentó una tendencia positiva del NDVI (mediana anual), frente a un 4,5 % (1671 Km²) que experimentó una tendencia negativa.

Figura 4. Tendencias interanuales del NDVI (mediana anual)

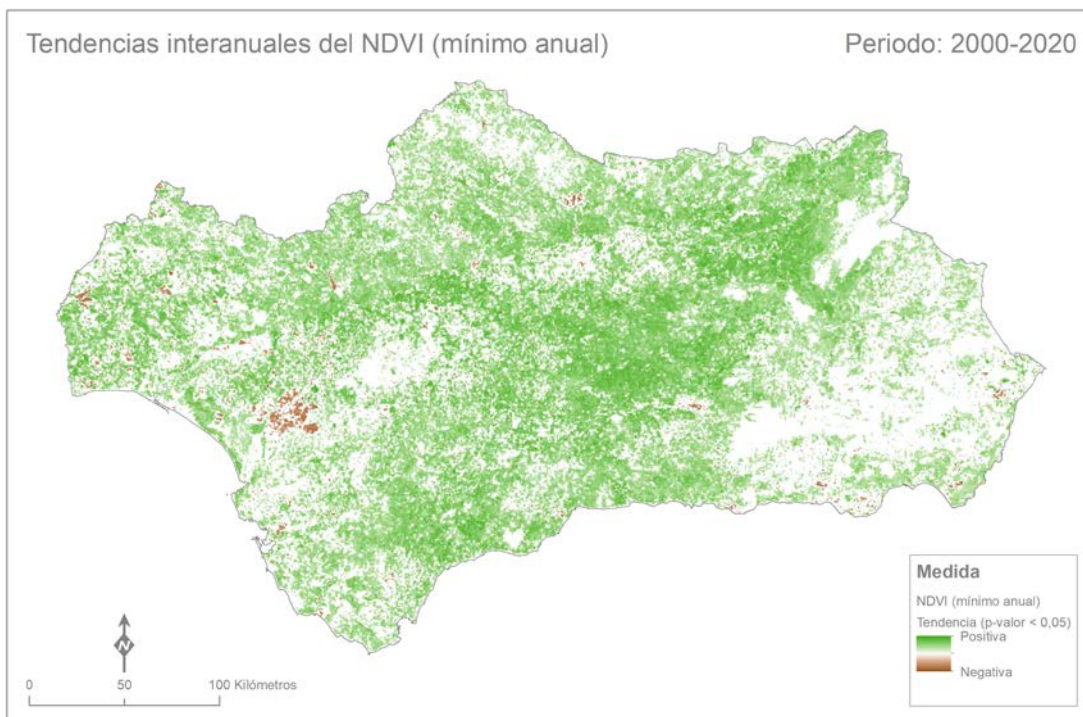
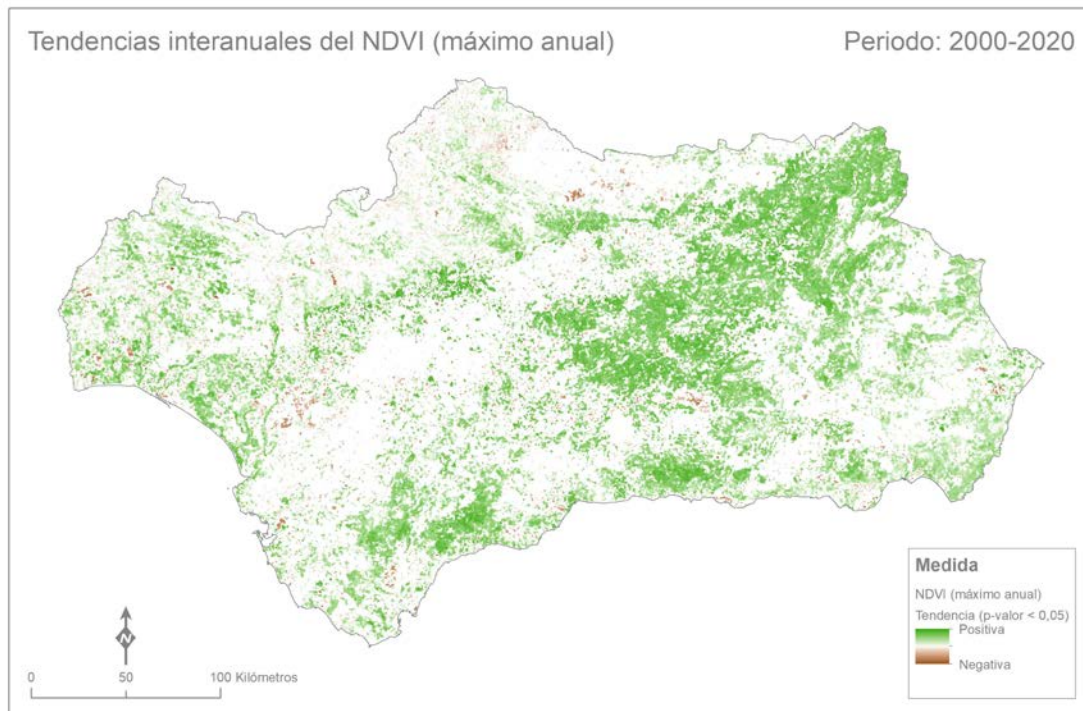


Fuente: elaboración propia

La Figura 5 representa las tendencias interanuales del NDVI (máximo anual y mínimo anual) por unidad espacial. Considerando los valores máximos anuales, el 44,1% (38 605 Km²) del territorio andaluz mostró una tendencia del NDVI (máximo anual) estadísticamente significativa (p-valor < 0,05), frente a un 55,9% (49 002 Km²) que no mostró una tendencia estadísticamente significativa. En el marco de las áreas donde se registró esta tendencia, el

93,1 % (35 930 Km²) de la superficie experimentó una tendencia positiva del NDVI (máximo anual), frente a un 6,9 % (2675 Km²) que experimentó una tendencia negativa.

Figura 5. Tendencias interanuales del NDVI (máximo anual y mínimo anual)



Fuente: elaboración propia

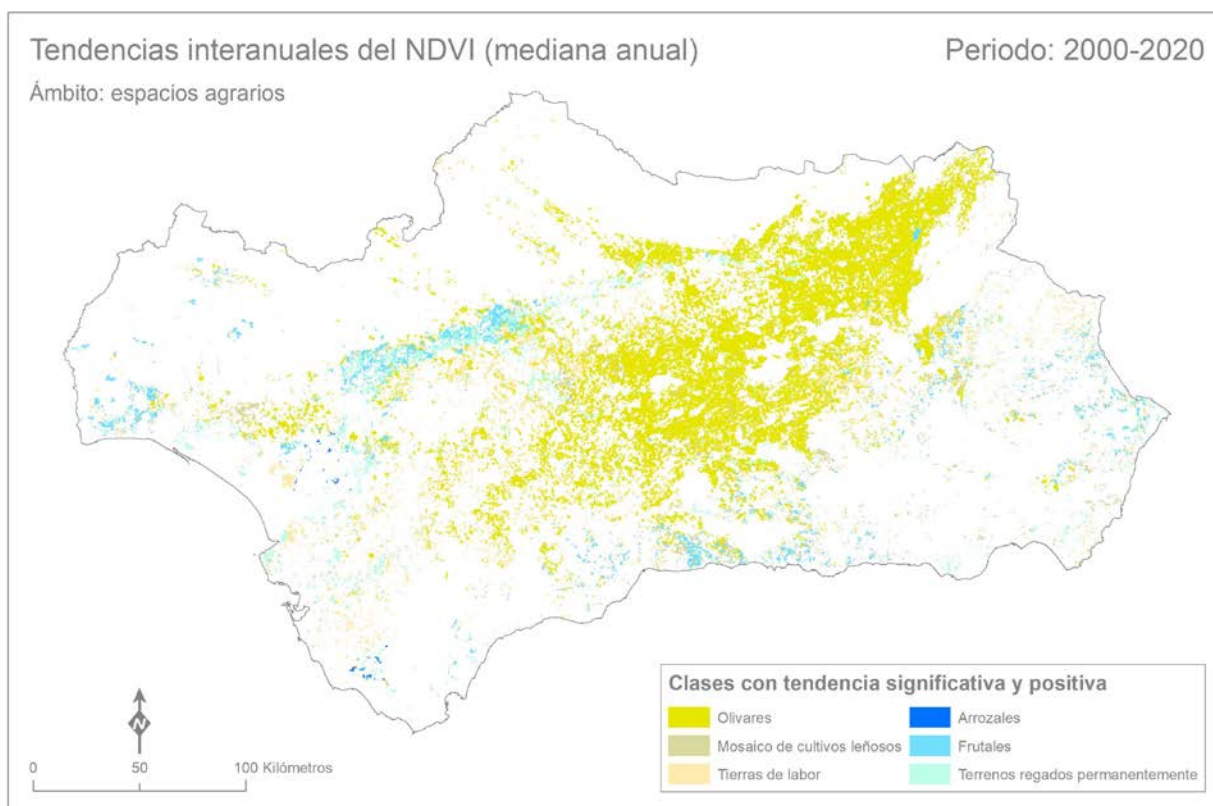
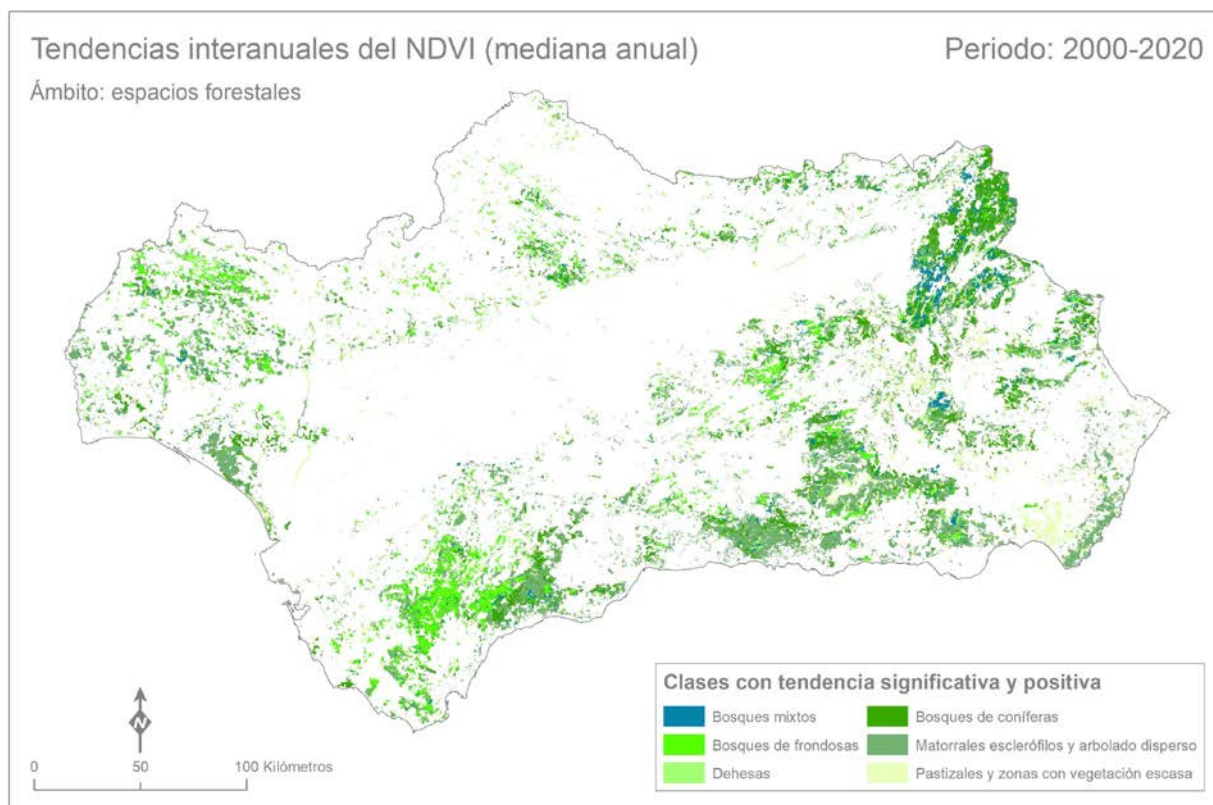
En relación con los valores mínimos anuales del NDVI, el 64,9 % (56 847 Km²) de la región mostró una tendencia estadísticamente significativa (p-valor < 0,05), frente a un 35,9 % (30 760 Km²) que no mostró una tendencia estadísticamente significativa. En este ámbito, el 98,4 % (55 922 Km²) de la superficie experimentó una tendencia positiva del NDVI (mínimo anual), frente a un 1,6 % (925 Km²) que experimentó una tendencia negativa.

En las Figuras 6, 7 y 8 se representan en qué clases de ocupación del suelo y en qué localizaciones se ha manifestado el reverdecimiento, que se ha definido como la tendencia interanual estadísticamente significativa y positiva del NDVI (mediana anual, máximo anual, mínimo anual). Esta tendencia se ha producido tanto en los espacios agrarios como en los forestales, pero no con la misma significación en todas sus variantes de ocupación del suelo. En general, ha tenido una mayor significación en los espacios agrarios y forestales del entorno de la depresión del Guadalquivir y las cordilleras Béticas, que sobre los espacios eminentemente agrosilvopastoriles de Sierra Morena.

En el ámbito de los espacios agrarios, destaca sobre el resto cubiertas, la tendencia positiva del NDVI experimentada en las superficies cubiertas por olivares. En segundo lugar, cabe destacar la tendencia positiva experimentada también por las cubiertas de frutales. Los terrenos regados permanentemente y arrozales, asomaron en mucha menor medida entre las clases de ocupación del suelo con tendencia positiva. Los mosaicos de cultivos leñosos y las tierras de labor apenas mostraron una tendencia significativa en núcleos dispersos situados entre cubiertas de olivares.

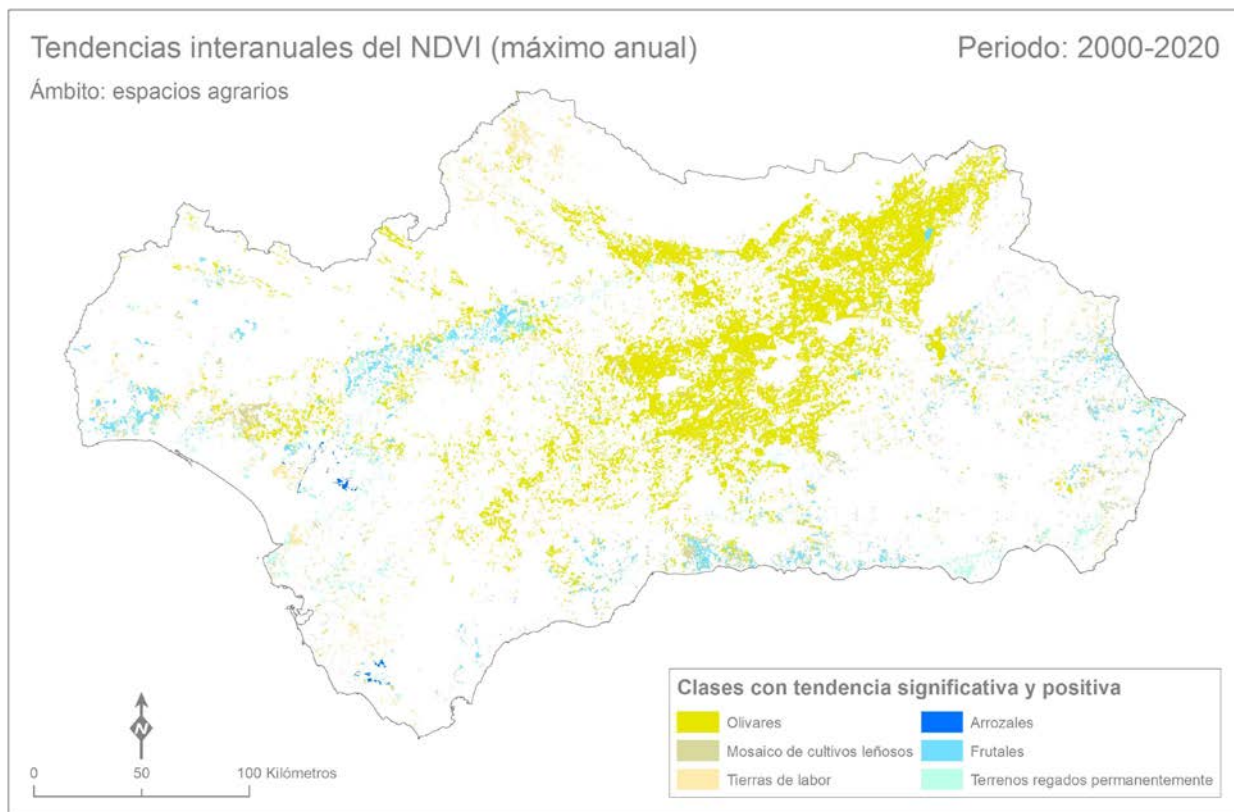
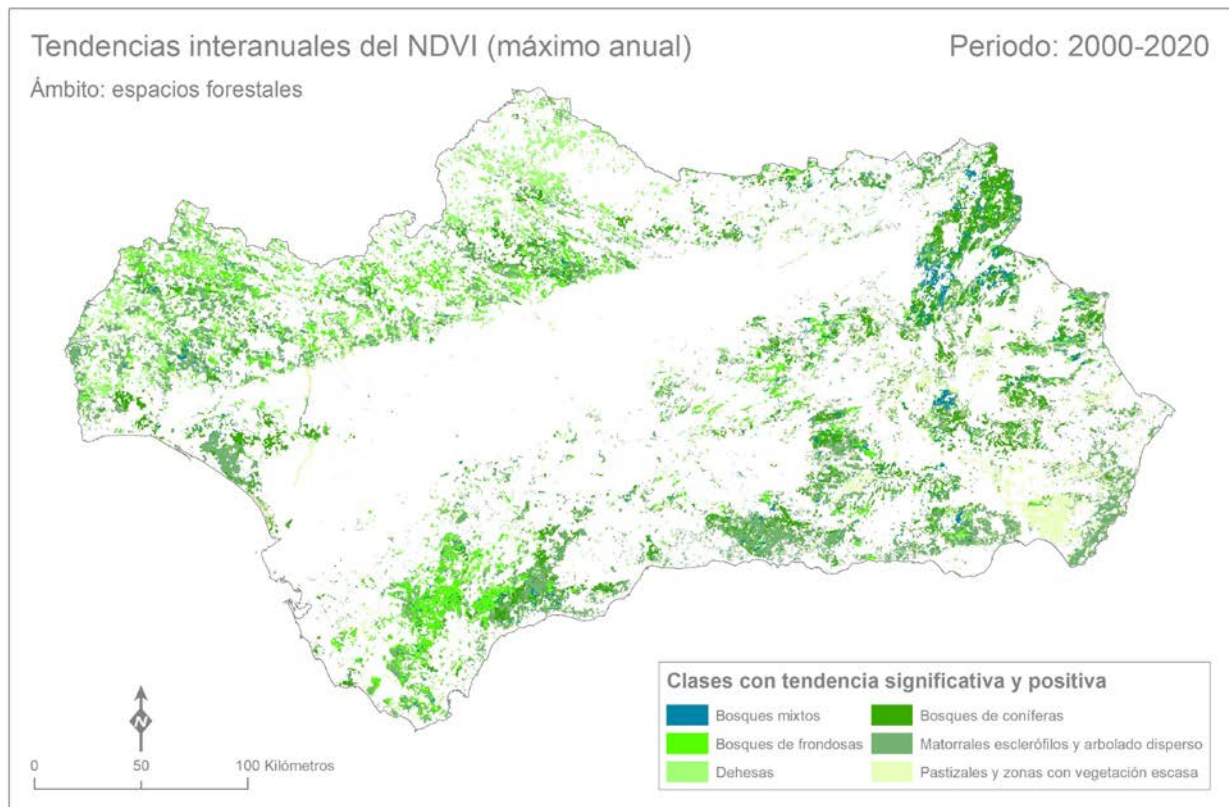
En el dominio territorial de los espacios forestales, los matorrales esclerófilos con arbolado disperso y los bosques constituyen las clases de ocupación del suelo donde predominó mayoritariamente el reverdecimiento, tendencia con una menor representación en las mismas cubiertas en Sierra Morena y extremo oriental de la región. Los bosques mixtos, que ocupan una extensión mucho más reducida en la región, también mostraron una tendencia positiva del NDVI, sobre todo en los espacios más agrestes del conjunto. Llama la atención la menor representación de esta tendencia en determinados sectores donde medran los bosques de frondosas, caso del sur de la provincia de Cádiz. Por otra parte, en un ámbito vinculado por proximidad espacial y ecológica con el anterior, las dehesas, apenas se encontró una tendencia significativa y positiva salvo en núcleos dispersos, y en cubiertas situadas en las proximidades de otras cubiertas. Esta ausencia de tendencia significativa también fue encontrada en otras cubiertas representadas mayoritariamente por pastizales.

Figura 6. Reverdecimiento (NDVI mediana anual) por clases de suelo



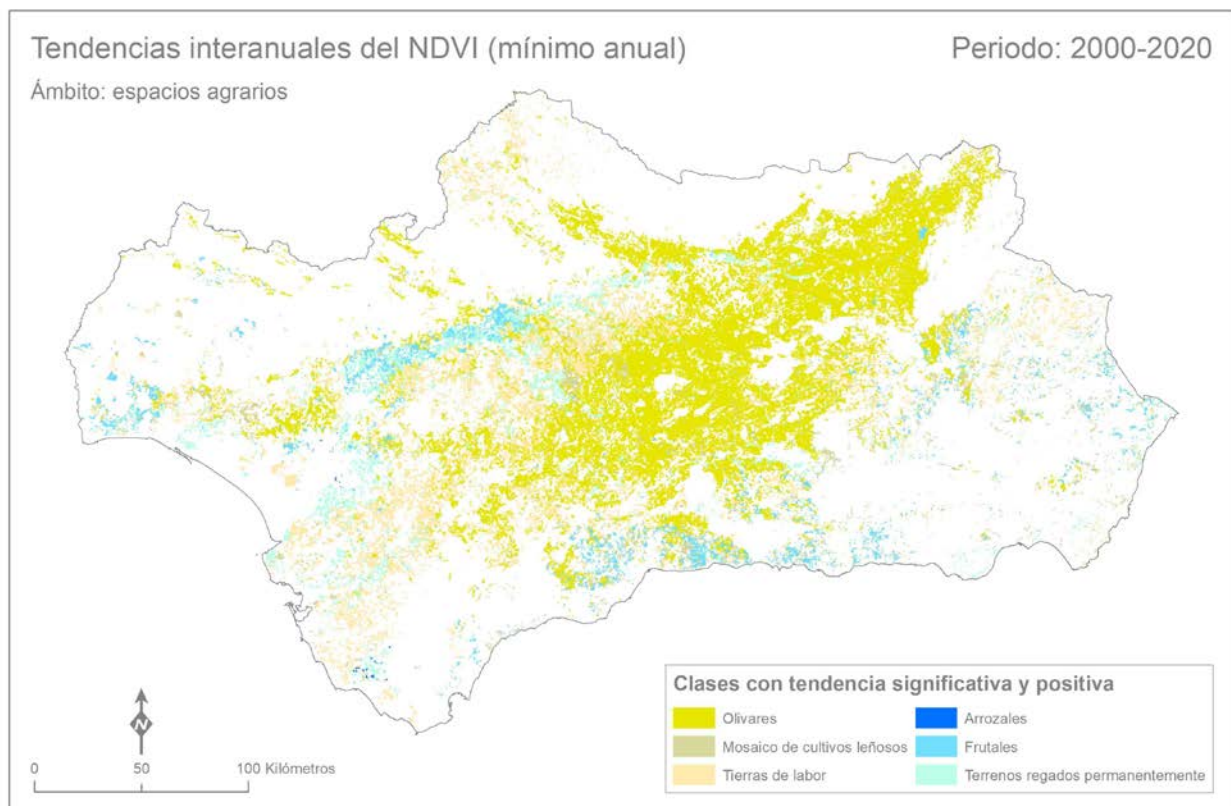
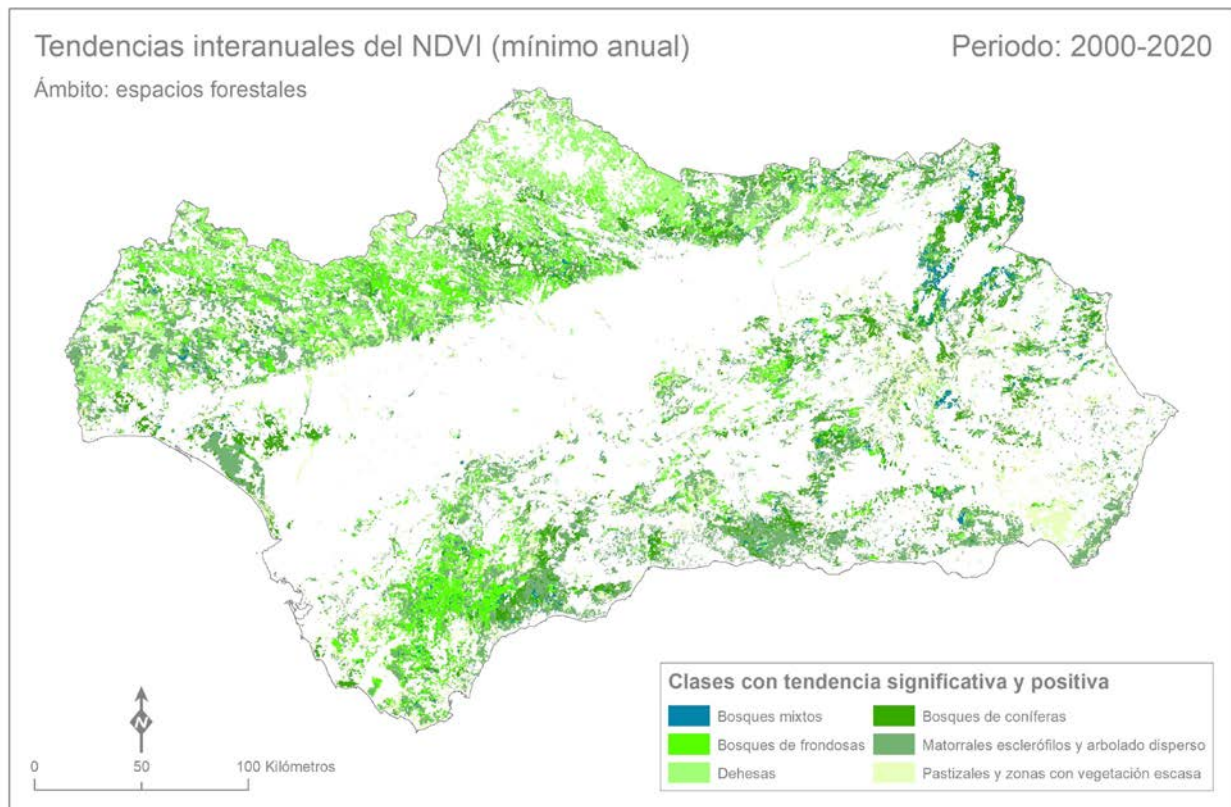
Fuente: elaboración propia

Figura 7. Reverdecimiento (NDVI máximo anual) por clases de suelo



Fuente: elaboración propia

Figura 8. Reverdecimiento (NDVI mínimo anual) por clases de suelo



Fuente: elaboración propia

4 Discusión

En esta investigación se ha abordado un análisis de la tendencia interanual del NDVI en Andalucía del periodo 2000–2020, sin mayor pretensión —porque no es un estudio de atribución— que analizar *sensu stricto* la dimensión estadística y espacial de las tendencias observadas. A continuación, se pretende contextualizar los resultados.

4.1 El contexto del reverdecimiento

Este es el primer trabajo de investigación circunscrito al territorio de la Comunidad Autónoma de Andalucía en el que se analiza las tendencias interanuales del NDVI y, además, evidencia un proceso de reverdecimiento allí donde las tendencias interanuales son significativas. Este proceso de reverdecimiento, también denominado *vegetation greening* —como es descrito en lengua inglesa en la literatura científica internacional— está alineado con tendencias similares encontradas en diversas regiones del mundo y a través de múltiples escalas espaciales y temporales (de Jong et al., 2011; Eastman et al., 2013; Olsson et al., 2005; Pei et al., 2021; Piao et al., 2015; Zhu et al., 2016).

En el ámbito más amplio de la península ibérica, investigaciones recientes han puesto de manifiesto un predominio de las tendencias positivas del NDVI (Alcaraz-Segura et al., 2010; del Barrio et al., 2010; Hill et al., 2008; Militino et al., 2018; Novillo et al., 2019; Vicente-Serrano et al., 2020). Vicente-Serrano et al (2020) analizaron series temporales (1981–2015) de imágenes satelitales (NOAA–AVHRR) y encontraron una clara tendencia positiva del NDVI, producida en entorno al 80 % del territorio de la España peninsular e Islas Baleares. Novillo et al. (2019), en cambio, analizaron una serie temporal mucho más corta (2001–2016) de imágenes de satélite (Terra-MODIS), y encontraron tendencias positivas (11,8 %) y negativas (7,6 %) para el mismo conjunto de la España peninsular e Islas Baleares. Los resultados obtenidos en la presente investigación se alinean más con los obtenidos por Vicente-Serrano et al (2020), en tanto que la mayor parte de las tendencias significativas observadas en nuestro caso también se relacionan con un proceso de reverdecimiento, y en tanto que las tendencias significativas y negativas apenas cubren un porcentaje marginal del territorio.

A escala global, los procesos de reverdecimiento se han relacionado mayormente por el incremento de las temperaturas, la fertilización global por CO₂ y el impacto de la actividad humana sobre los usos del suelo (Chen et al., 2019; Zhu et al., 2016). A escala continental, Europa es una de las regiones donde se ha manifestado con mayor vigor las tendencias positivas del NDVI (Cortés et al., 2021; Gutiérrez-Hernández & García, 2021; Yang et al.,

2019). Las tendencias de reverdecimiento registradas en Andalucía se alinean pues con la encontradas en el resto de la península ibérica y el conjunto del continente europeo.

En las últimas décadas, se está evidenciando un incremento de las temperaturas, cambios en el reparto de las precipitaciones y un aumento de la frecuencia e intensidad de las sequías en la región mediterránea (Romero & Olcina Cantos, 2021). A escala regional, cabría esperar un impacto negativo sobre la dinámica de la vegetación en Andalucía (Camarero et al., 2017; Martínez-Vilalta et al., 2012). Sin embargo, las tendencias recientes del NDVI en el sur de la península ibérica no apuntan en esta dirección, al menos como un proceso generalizado, y se alinean con los modelos observados para el conjunto de la península ibérica, en tanto que la mayor parte de las tendencias significativas fueron positivas, y registradas tanto en espacios agrarios como en espacios forestales, aunque con una desigual representación en las distintas clases de ocupación. A continuación, se profundizará sobre los factores que podrían explicar esta tendencia.

En el caso de los espacios agrarios, las transformaciones recientemente experimentadas en Andalucía con la intensificación de los cultivos y la expansión del regadío, incluso en cultivos tradicionalmente de secano, en un marco de una agricultura que ha apostado por un modelo cada vez más extractivista (Vigil-Villodres, 2021), parecen estar detrás del incremento del NDVI. El máximo exponente de esta tendencia lo representa el olivar, cultivo que ha experimentado un claro proceso de intensificación con incremento del regadío (Araque Jiménez et al., 2002; Gutiérrez-Hernández et al., 2016; Paniza Cabrera et al., 2015; Sánchez Martínez et al., 2011). Por su parte, en los espacios forestales, las tendencias positivas registradas podrían estar relacionadas con otro tipo de dinámicas, aunque también vinculadas con los usos y aprovechamientos del suelo. El abandono del campo y las actividades agrarias y ganaderas en espacios montañosos, se ha relacionado con un incremento de los procesos de revegetación del campo (Lasanta-Martínez et al., 2005; Lasanta & Vicente-Serrano, 2012). En las últimas décadas del siglo XX y principios del XXI, Andalucía experimentó un proceso de reforestación (Araque Jiménez & Martínez, Sánchez, 2009; Araque Jiménez, 2015; Bermejo Pérez et al., 2011; Gutiérrez-Hernández et al., 2016; Muñoz-Rojas et al., 2011), y las dinámicas recientes de la vegetación apuntan a un mantenimiento de la tendencia de matorralización y reforestación (Cabello & Castro, 2012), todo ello, protagonizado por especies y comunidades vegetales esclerófilas muy adaptadas las sequías estacionales e interanuales. En este dominio, el máximo exponente de las tendencias positivas, lo encontramos en los matorrales esclerófilos con arbolado disperso. Por tanto, el incremento del NDVI en determinados espacios agrarios y

espacios forestales andaluces podría estar explicado por la interacción, en primer término, de la acción humana, que ha impulsado cambios en los usos y aprovechamientos del suelo, y; en segundo término, por la incidencia de los factores que están experimentando una clara tendencia en Andalucía, especialmente, el incremento de la temperatura.

El NDVI se ha interpretado como un indicador del estado y salud de la vegetación (Huang et al., 2021), pero la interpretación de las tendencias requiere la incorporación de un contexto mucho más amplio. Por tanto, es necesario profundizar acerca de la problemática ambiental que puede derivarse de las tendencias observadas. A continuación, se profundizará sobre *los límites del reverdecimiento*.

4.2 Los límites del reverdecimiento

En relación con los límites del reverdecimiento en los agrarios, la intensificación de los cultivos y la expansión de los regadíos está provocando un aumento de la actividad vegetal y la productividad. Aquí la acción humana interacciona con el incremento de la temperatura y conjuntamente contribuye a potenciar la productividad de los agrosistemas de regadío. Esta tendencia no encuentra su correspondencia con la experimentada mayoritariamente en los cultivos de secano, pues más bien se advierte un desacople en relación con la humedad en el suelo (Almendra-Martín et al., 2021). El mantenimiento de la tendencia positiva del NDVI en este ámbito ((cultivos leñosos tradicionalmente en secano) podría representar la antesala del colapso hídrico en determinados agrosistemas andaluces relación con la escasez del recurso agua, sobre todo si se tiene en cuenta la fuerte resistencia de los sectores productivos frente al cambio (Lafuente et al., 2020). En este sentido, llama la atención, por sus magnitudes espaciales, la trayectoria experimentada por el monocultivo del olivo (Martínez et al., 2008). Cada vez existe una mayor preocupación por la optimización del recurso agua en cultivos tan intensivos en agua como los tropicales de la costa mediterránea andaluza (Moreno-Ortega et al., 2019). Esta preocupación revela una de las situaciones más paradigmáticas, el caso de la baja Axarquía malagueña, donde ya se habla de una auténtica burbuja de los cultivos subtropicales y la emergencia de una situación de colapso hídrico (Yus Ramos, 2020).

En relación con los límites del reverdecimiento en los espacios forestales, las tendencias positivas del NDVI en el ámbito de los espacios forestales encierran dinámicas muy variopintas. En general, parece evidente un proceso de recuperación de la cobertura forestal, que se ha producido en un contexto de abandono de muchas zonas rurales y de cambio de usos y aprovechamientos, pero que a su vez interacciona con la sequía y con las variables topográficas,

factores que condicionan la disponibilidad de agua y determinan diferentes trayectorias o transiciones forestales, en las que unas comunidades forestales son beneficiadas frente a otras que resultan perjudicadas (Delgado-Artés et al., 2022; José Vidal-Macua et al., 2017). La matorralización y revegetación con bosques secundarios evidencia una adaptación de las comunidades mejor adaptadas a la sequía (Palmero-iniesta et al., 2021), parámetro que está experimentando una tendencia positiva si consideramos los incrementos de temperatura y evapotranspiración en el sur de la península ibérica (Páscoa et al., 2021; Tomas-Burguera et al., 2021). En este nuevo contexto socioecológico y ambiental, el impacto de los incendios forestales está cobrando una mayor importancia sobre la dinámica de la vegetación en la región mediterránea (Resco de Dios et al., 2006). Un claro ejemplo se encuentra en la tendencia positiva del NDVI en el traspais montañoso de la costa mediterránea andaluza (Martínez-Murillo et al., 2016). Aquí las cubiertas forestales mostraron una tendencia estadísticamente significativa y positiva del NDVI, excepto en los enclaves donde se han producido incendios forestales relativamente recientes, en lo que se detectó una tendencia estadísticamente significativa en el tiempo, pero sí están experimentando una tendencia positiva que podría llegar a ser estadísticamente significativa con el paso de los años. Paradójicamente, en estas áreas donde las tendencias positivas del NDVI se mantienen en el tiempo, suelen devenir grandes incendios forestales. Por ejemplo, en esta investigación se detectó una clara tendencia significativa en matorrales y bosques esclerófilos de Sierra Bermeja, previo a los incendios forestales del verano de 2021, no registrados en la serie temporal analizada (2000–2020). Estas perturbaciones ambientales están favoreciendo unas especies y comunidades vegetales en detrimento otras, merced a una mejor adaptación a las dinámicas post-fuego de las primeras sobre las segundas (Hidalgo-Triana & Pérez-Latorre, 2021). De acuerdo con los escenarios de cambio climático previstos, se esperan veranos cada vez más cálidos con episodios de calor extremo cada vez recurrentes (Pereira et al., 2021), por lo que en zonas donde hay grandes acumulaciones de biomasa forestal, es posible que los incendios forestales de mayor magnitud sean también cada vez más frecuentes (Molina & Galiana-Martín, 2016; Resco de Dios et al., 2022).

En este punto es momento de comentar las limitaciones de la metodología empleada y sugerir futuras líneas de investigación que puedan representar tanto una continuidad como una mejora de los resultados obtenidos en futuros trabajos de investigación. La resolución espacial, la longitud de la serie temporal, los periodos de referencia y las técnicas estadísticas aplicadas son factores que influyen sobre los resultados obtenidos. En esta investigación se trabajó con las imágenes de mayor detalle del sensor Terra-MODIS y se incluyó la cobertura de imágenes

satelitales del citado sensor más completa hasta la fecha de análisis. En lo sucesivo, se advierte la necesidad de ampliar (actualizar) las series temporales y reanalizar los datos introduciendo variantes y mejoras en el tratamiento de datos y análisis estadístico de tendencias. Los productos MOD13Q1 de MODIS tienen una cobertura de 23 imágenes anuales. En este trabajo, se procesaron todas las imágenes para analizar series interanuales. Se puede aplicar directamente un análisis de tendencia sobre todas las imágenes, si bien para aplicar las pruebas de tendencia monótona sería necesario transformar los valores del NDVI en anomalías; en este sentido, los resultados no aportarían información adicional novedosa en relación con los obtenidos en esta investigación. En cambio, se sugiere profundizar en el estudio de la dimensión estacional y sus tendencias (Eastman et al., 2009), de esta manera futuras líneas de investigación integrarían análisis de la dinámica de la vegetación y análisis de la fenología de la superficie terrestre (Helman, 2018). El análisis de los ciclos fenológicos permite un mejor acoplamiento con respecto a cubiertas agrarias o forestales más específicas y sincronizar la monitorización fenológica junto con la monitorización del cambio climático (Cleland et al., 2007; Zhang et al., 2003). En este nivel de detalle, se requiere una información más precisa sobre la ocupación del suelo. El proyecto Corine Land Cover aporta información actualizada sobre la ocupación del suelo, pero se obtiene mediante generalización del SIOSE, por lo que análisis más detallados requerirán la verificación de las cubiertas a través de fotointerpretación. Por último, todo análisis de tendencia basa sus conclusiones en función de la significación estadística de las tendencias en el tiempo. En el marco del contraste de hipótesis (Guisande González et al., 2013), se suele fijar un p-valor $< 0,05$ para determinar la significación estadística, umbral que puede ser más restrictivo o inferior (p-valor $< 0,01$; p-valor $< 0,001$), o incluso menos restrictivo o superior (p-valor $< 0,1$). En esta investigación se optó por el criterio más extendido (Wasserstein & Lazar, 2016). En futuros trabajos, se tratará de abordar esta cuestión con objeto de controlar el error del tipo I (rechazar la hipótesis nula cuando es verdadera) y los efectos derivados de la multiplicidad (Cortés et al., 2020, 2021; García, 2003).

Por último, Cámara-Artigas (2018) ha puesto de manifiesto la escasa presencia de los métodos y técnicas de teledetección en el contexto de la biogeografía académica, una situación que aún persiste. En este sentido, el presente trabajo pretende reivindicar la importancia de la teledetección en el marco de la biogeografía y la necesidad de potenciar estudios sobre la dinámica de la vegetación mediante sensores remotos. Esta aproximación facilita el estudio integrado de los ecosistemas y agrosistemas –considerados conjuntamente bajo el denominador

común de la actividad vegetal— y permite establecer puentes entre campos que tradicionalmente apenas han establecido contactos incluso en el mismo el ámbito académico de la geografía.

5 Conclusiones

En esta investigación se analizó la tendencia interanual del NDVI del periodo 2000–2020 en la Comunidad Autónoma de Andalucía a través de los productos de índice de vegetación MODIS y los resultados evidencian un importante proceso de reverdecimiento, especialmente relevante en cubiertas de olivares y frutales, y matorrales con arbolado disperso y bosques. La intensificación de los sistemas de cultivos con la expansión del regadío en los espacios agrarios, por un lado, y la problemática (despoblación, abandono de las bases productivas, falta de gestión forestal, etc.) que vienen experimentando los espacios forestales en los últimos años, por otro lado, parecen interactuar con otros factores ambientales (e.g. climáticos). Sin embargo, en los espacios agrarios este proceso de reverdecimiento es sumamente dependiente de los escasos recursos hídricos disponibles, y, en los espacios forestales, parece estar relacionado con cambios en la gestión del paisaje y perturbaciones ambientales. Los escenarios de cambio climático previstos podrían jugar un rol clave en los límites del reverdecimiento, por lo que urge la implantación de estrategias de adaptación de los paisajes agrarios y forestales de la región.

Agradecimientos: Al equipo de [MODISsp](#). En el desarrollo de esta investigación, utilicé diversos recursos y herramientas. Una de ellas fue MODISsp, un paquete del [entorno de análisis de datos de R](#) desarrollado por Lorenzo Busetto y Luigi Ranghetti. En mis primeros pasos con este paquete, tanto Lorenzo Busetto como Luigi Ranghetti, me resolvieron con solvencia y amabilidad varias consultas relacionadas con el uso de MODISsp. Toda mi admiración y gratitud por el trabajo de los desarrolladores. Este trabajo está dedicado, específicamente, a la memoria de [Lorenzo Busetto](#), y también a su compañero Luigi Ranghetti, quien actualmente mantiene el desarrollo de MODISsp. A compañeros y personal de la [Universidad Autónoma de Madrid \(UAM\)](#). Durante el curso 2021-2022, fui profesor en la UAM. Agradezco la muy buena acogida que tuve por parte de los compañeros del Departamento de Geografía. Agradecimiento extensivo a todo el personal con el que mantuve contacto en esta universidad y que contribuye con su talante y capacidad al buen funcionamiento de la UAM. Después del confinamiento provocado por COVID-19 y las clases a distancia, durante el citado curso 2021-2022, me reencontré con las aulas físicas, las clases presenciales y el contacto directo con los estudiantes. Guardo el mejor de los recuerdos de mi estancia en Madrid.

Declaración responsable: Como autor, declaro que no existe ningún conflicto de interés con relación a la publicación de este artículo. No hubo proyecto ni fuente de financiación que financiara específicamente nada relacionado con esta investigación. Sin embargo, entiendo que todo profesor de universidad, como personal docente e investigador, tiene la obligación moral de investigar de acuerdo con los medios que disponga.

Bibliografía

- Alcaraz-Segura, D., Cabello, J., & Paruelo, J. (2009). Baseline characterization of major Iberian vegetation types based on the NDVI dynamics. *Plant Ecology*, 202, 13-29. <https://doi.org/10.1007/s11258-008-9555-2>
- Alcaraz-Segura, D., Liras, E., Tabik, Paruelo, J., & Cabello, J. (2010). Evaluating the consistency of the 1982-1999 NDVI trends in the Iberian Peninsula across four time-series derived from the AVHRR sensor: LTDR, GIMMS, FASIR, and PAL-II. *Sensors*, 10(2), 1291-1314. <https://doi.org/10.3390/s100201291>
- Alcaraz, D., Paruelo, J., & Cabello, J. (2006). Identification of current ecosystem functional types in the Iberian Peninsula. *Global Ecology and Biogeography*, 15(2), 200-212. <https://doi.org/10.1111/j.1466-822X.2006.00215.x>
- Almendra-Martín, L., Martínez-Fernández, J., González-Zamora, Benito-Verdugo, P., & Herrero-Jiménez, C.M. (2021). Agricultural drought trends on the iberian peninsula: An analysis using modeled and reanalysis soil moisture products. *Atmosphere*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/atmos12020236>
- Anyamba, A., & Tucker, C.J. (2005). Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981-2003. *Journal of Arid Environments*, 63(3), 596–614. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.03.007>
- Araque Jiménez, E. (2015). Medio siglo de grandes incendios forestales en Andalucía (1961-2011). *Méditerranée*, 121, 41–52. <https://doi.org/10.4000/mediterranee.6840>
- Araque Jiménez, E., Gallego Simón, V., & Sánchez Martínez, J. (2002). El olivar regado en la provincia de Jaén. *Investigaciones Geográficas*, 28(5). <https://doi.org/10.14198/INGEO2002.28.03>
- Araque Jiménez, E., & Martínez, Sánchez, J. (2009). *Repoblación forestal en Andalucía: Intervenciones históricas y situación actual*. Universidad de Jaén.
- Beck, P.S.A., Atzberger, C., Høgda, K.A., Johansen, B., & Skidmore, A.K. (2006). Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 100(3), 321-334. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.10.021>

Bermejo Pérez, D., Cáceres Clavero, F., & Moreira Madueño, J.M. (2011). Medio siglo de cambios en la evolución de usos de suelo de Andalucía (1956-2007). Junta de Andalucía, Consejería de Medio Ambiente.

Bogaert, J., Zhou, L., Tucker, Myneni, R.B., & Ceulemans, R. (2002). Evidence for a persistent and extensive greening trend in Eurasia inferred from satellite vegetation index data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D11), ACL 4-1-ACL 4-14. <https://doi.org/10.1029/2001JD001075>

Busetto, L., & Ranghetti, L. (2016). MODISStsp: An R package for automatic preprocessing of MODIS Land Products time series. *Computers & Geosciences*, 97, 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.08.020>

Cabello, J., & Castro, A.J. (2012). *Estado y tendencia de los servicios de los ecosistemas de Alta Montaña de Andalucía*. Consejería de Medio Ambiente & Junta de Andalucía.

Cámara-Artigas, R. (2018). Reflexión desde la Geografía en torno a la evolución de la Biogeografía en los últimos 25 años. In *Bosque mediterráneo y humedales: paisaje, evolución y conservación: aportaciones desde la biogeografía* (pp. 69-82). Almud, Ediciones de Castilla-La Mancha.

Cámara Artigas, R., & Díaz del Olmo, F. (2013). Muestreo en transecto de formaciones vegetales de fanerófitos y caméfitos (I): fundamentos metodológicos. *Estudios Geográficos*, 74(274), 67-88. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201303>

Camarero, J.J., Linares, J.C., Sangüesa-Barreda, G., Sánchez-Salguero, R., Gazol, A., Navarro-Cerrillo, R.M., Carreira, J.A. (2017). The Multiple Causes of Forest Decline in Spain: Drought, Historical Logging, Competition and Biotic Stressors. In *Dendroecology. Tree-Ring Analyses Applied to Ecological Studies* (pp. 307-323). https://doi.org/10.1007/978-3-319-61669-8_13

Caparros-Santiago, J.A., & Rodríguez-Galiano, V.F. (2020). Estimación de la fenología de la vegetación a partir de imágenes de satélite: el caso de la península ibérica e islas Baleares (2001-2017). *Revista de Teledetección*, 57(25). <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13632>

Chen, C., Park, T., Wang, X., Piao, S., Xu, B., Chaturvedi, R.K., Fuchs, R., Brovkin, V., Ciais, P., Fensholt, R., Tømmervik, H., Bala, G., Zhu, Z., Nemani, R.R., & Myneni, R.B. (2019). China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability*, 2(2), 122-129. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0220-7>

Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental*. Ariel.

- Clarivate Analytics (2021). *Research Fronts 2020*. Clarivate Analytics (Clarivate). https://discover.clarivate.com/ResearchFronts2020_EN
- Cleland, E., Chuine, I., Menzel, A., Mooney, H.A., & Schwartz, M.D. (2007). Shifting plant phenology in response to global change. *Trends in Ecology & Evolution*, 22(7), 357-365. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.04.003>
- Copernicus (n.d.). [Website]. <https://www.copernicus.eu/es>
- CORINE Land Cover (n.d.). [Online cartography]. <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>
- Cortés, J., Mahecha, M.D., Reichstein, M., Myneni, R.B., Chen, C., & Brenning, A. (2021). Where Are Global Vegetation Greening and Browning Trends Significant? *Geophysical Research Letters*, 48(6), e2020GL091496. <https://doi.org/10.1029/2020GL091496>
- Cortés, J., Mahecha, M., Reichstein, M., & Brenning, A. (2020). Accounting for multiple testing in the analysis of spatio-temporal environmental data. *Environmental and Ecological Statistics*, 27(2), 293-318. <https://doi.org/10.1007/s10651-020-00446-4>
- de Jong, R., de Bruin, S., de Wit, A., ... & Dent, D. L. (2011). Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series. *Remote Sensing of Environment*, 115(2), 692-702. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.10.011>
- del Barrio, G., Puigdefabregas, J., Sanjuan, M.E., Stellmes, M., & Ruiz, A. (2010). Assessment and monitoring of land condition in the Iberian Peninsula, 1989-2000. *Remote Sensing of Environment*, 114(8), 1817-1832. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.03.009>
- Delgado-Artés, R., Garófano-Gómez, V., Oliver-Villanueva, J.V., & Rojas-Briales, E. (2022). Land use/cover change analysis in the Mediterranean region: a regional case study of forest evolution in Castelló (Spain) over 50 years. *Land Use Policy*, 114, 105967. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105967>
- DERA (n.d.) Datos Espaciales de Referencia de Andalucía (DERA). <https://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/DERA/>
- Didan, K. (2015). MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.006>

- Eamus, D., Huete, A., & Yu, Q. (2016). *Vegetation Dynamics. A Synthesis of Plant Ecophysiology, Remote Sensing and Modelling*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107286221>
- Eastman, J. (2020). *TerrSet 2020: Geospatial Monitoring and Modeling Software [Manual]*. Clark University. <https://clarklabs.org/>
- Eastman, J. (2021). *TerrSet: Geospatial Monitoring and Modeling Software. Version 19.06*. Clark University. <https://clarklabs.org/>
- Eastman, J.R., Sangermano, F., Ghimire, B., Zhu, H., Chen, H., Neeti, N., Cai, Y., Machado, E.A., & Crema, S. C. (2009). Seasonal trend analysis of image time series. *International Journal of Remote Sensing*, 30(10), 2721-2726. <https://doi.org/10.1080/01431160902755338>
- Eastman, J. R., Sangermano, F., Machado, E.A., Rogan, J., & Anyamba, A. (2013). Global trends in seasonality of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), 1982-2011. *Remote Sensing*, 5(10), 4799-4818. <https://doi.org/10.3390/rs5104799>
- Ferreras Chasco, C., & Fidalgo Hijano, C. (1991). *Biogeografía y edafogeografía*. Síntesis.
- Franklin, J. (1995). Predictive vegetation mapping: geographic modelling of biospatial patterns in relation to environmental gradients. *Progress in Physical Geography*, 19, 474-499. <https://doi.org/10.1177/030913339501900403>
- García, L.V. (2003). Controlling the false discovery rate in ecological research. *Trends in Ecology and Evolution*, 18(11), 553-554. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2003.08.011>
- Goetz, S.J., Bunn, A.G., Fiske, G.J., & Houghton, R.A. (2005). Satellite-observed photosynthetic trends across boreal North America associated with climate and fire disturbance. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(38), 13521-13525. <https://doi.org/10.1073/pnas.0506179102>
- Gómez-Zotano, J., Alcántara-Manzanares, J., Olmedo-Cobo, J.A., & Martínez-Ibarra, E. (2015). La sistematización del clima mediterráneo: identificación, clasificación y caracterización climática de Andalucía (España). *Revista de Geografía Norte Grande*, 61, 161-180. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022015000200009>
- Guisande González, C., Vaamonde Liste, A., & Barreiro Felpeto, A. (2013). *Tratamiento de datos con R, STATISTICA y SPSS*. Ediciones Díaz de Santos.

- Gutiérrez-Hernández, O., & García, L. V. (2021). Seasonal Trend Analysis of MODIS-EVI time series over Europe (2000-2020). In *2021 EUROGEO Annual Meeting and Conference*. Madrid, April 22-23. <https://doi.org/http://doi.org/10.5281/zenodo.4716853>
- Gutiérrez-Hernández, O., Senciales-González, J.M., & García, L.V. (2016). Evolución de la Superficie Forestal en Andalucía. Procesos y factores. *Revista de Estudios Andaluces*, 33(1), 111-148. <https://doi.org/10.12795/rea.2016.i33>
- Helman, D. (2018). Land surface phenology: What do we really 'see' from space? *Science of the Total Environment*, 618, 665-673. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.237>
- Hidalgo-Triana, N., & Pérez-Latorre, A. V. (2021). Incendios en los pinares serpentínícolos de Sierra de Alpujata (Serranía de Ronda): estacionalidad de la respuesta al fuego. In *Los bosques de la Serranía de Ronda. Una perspectiva espacio-temporal* (pp. 375-389). Editorial La Serranía.
- Hill, J., Stellmes, M., Udelhoven, T., Röder, A., & Sommer, S. (2008). Mediterranean desertification and land degradation. Mapping related land use change syndromes based on satellite observations. *Global and Planetary Change*, 64(3-4), 146-157. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.10.005>
- Hoaglin, D., Mosteller, F., & Tukey, J. (2000). *Understanding Robust and Exploratory Data Analysis*. John Wiley and Sons.
- Holben, B.N. (1986). Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11), 1417-1434. <https://doi.org/10.1080/01431168608948945>
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J.P., Wang, Y., & Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32(1), 1-6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>
- Humboldt, A. Von. (1805). *Essai sur le Géographie des Plantes*. Schoell, Lebrault & CO.
- IGN-CNIG (n.d.). *Centro de descargas*. Organismo autónomo Centro Nacional de Información Geográfica. <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>
- Ichii, K., Kawabata, A., & Yamaguchi, Y. (2002). Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982-1990. *International Journal of Remote Sensing*, 23(18), 3873-3878. <https://doi.org/10.1080/01431160110119416>

- IGN (2018). *CORINE Land Cover de España* (2018). Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. <https://centrodedescargas.cnig.es/>
- Jones, H.G., & Vaughan, R.A. (2010). *Remote Sensing of Vegetation: Principles, Techniques, and Applications*. Oxford University Press.
- Kendall, M. (1975). *Rank Correlation Methods*. Charles Griffin.
- Lafuente, R., Ganuza, E., & Paneque, P. (2020). Social resistance to the hydrological transition in southern Spain: Public support for the building of new reservoirs. *Resources*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/resources9030022>
- Lasanta-Martínez, T., Vicente-Serrano, S.M., & Cuadrat-Prats, J.M. (2005). Mountain Mediterranean landscape evolution caused by the abandonment of traditional primary activities: a study of the Spanish Central Pyrenees. *Applied Geography*, 25(1), 47-65. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2004.11.001>
- Lasanta, T., & Vicente-Serrano, S.M. (2012). Complex land cover change processes in semiarid Mediterranean regions: An approach using Landsat images in northeast Spain. *Remote Sensing of Environment*, 124, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.04.023>
- López Ontiveros, A. (2003a). El territorio andaluz: su formación, delimitación e interpretación, en Geografía de Andalucía. In *Geografía de Andalucía* (p. 819). Ariel.
- López Ontiveros, A. (2003b). *Geografía de Andalucía*. Ariel.
- López Ontiveros, A. (2003c). Unidad y variedad de Andalucía. In *Geografía de Andalucía* (pp. 813-845). Ariel.
- López Palomeque, F., & Plaza Gutiérrez, J.I. (2019). *Geografía de Europa. Estructuras procesos y dinámicas*. Tirant lo Blanch.
- Lucht, W., Prentice, I. C., Myneni, R.B., Sitch, S., Friedlingstein, P., Cramer, W., Bousquet, P., Buermann, W., & Smith, B. (2002). Climatic control of the high-latitude vegetation greening trend and Pinatubo effect. *Science*, 296(5573), 1687-1689. <https://doi.org/10.1126/science.1071828>
- Mann, H. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13, 245-59. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Martínez-Murillo, J.F., Remond, R., Hueso-González, P., & Ruiz-Sinoga, J.D. (2016). Resiliencia de la cubierta vegetal en un área de montaña mediterránea afectada por el fuego: el caso del

incendio de Río Verde (provincia de Málaga, sur de España). *Pirineos*, 171, e024. <https://doi.org/10.3989/pirineos.2016.171008>

Martínez-Vilalta, J., Lloret, F., & Breshears, D.D. (2012). Drought-induced forest decline: causes, scope and implications. *Biology Letters*, 8(5), 689-691. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2011.1059>

Martínez, J.D.S., Simón, V.J.G., & Jiménez, E.A. (2008). El monocultivo olivarero jiennense: ¿del productivismo a la sostenibilidad? *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, (47), 245-270. <https://bage.age-geografia.es/ojs/index.php/bage/article/view/2038/1951>

Mas, J. (Coord). (2011). *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio*. Universidad Nacional Autónoma de México. https://www.ciga.unam.mx/publicaciones/images/abook_file/aplicacionesMODIS.pdf

Meaza, G., Arozarena Concepción, M. E., Beltrán Yanes, E., Cabiñanos Aguirre, J.A., Ferreras Chasco, C., Lozano Valencia, P., Meaza Rodríguez, G., Molina Holgado, P., Panareda Clopés, J.M.^a & Pintó Fusalba, J. (2000). *Metodología y práctica de la biogeografía*. Serbal.

Militino, A.F., Ugarte, M.D., & Pérez-Goya, U. (2018). Detecting Change-Points in the Time Series of Surfaces Occupied by Pre-defined NDVI Categories in Continental Spain from 1981 to 2015. In *Studies in Systems, Decision and Control* (vol. 142). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73848-2_28

Molina, C.M., & Galiana-Martín, L. (2016). Fire scenarios in Spain: A territorial approach to proactive fire management in the context of global change. *Forests*, 7(11). <https://doi.org/10.3390/f7110273>

Moreira Madueño, J.M. (2003). El relieve y las costas andaluzas. In *Geografía de Andalucía* (pp. 81-135). Ariel.

Moreno-Ortega, G., Pliego, C., Sarmiento, D., Barceló, E., & Martínez-Ferri, E. (2019). Yield and fruit quality of avocado trees under different regimes of water supply in the subtropical coast of Spain. *Agricultural Water Management*, 221(April), 192-201. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.05.001>

Mueller, T., Dressler, G., Tucker, C.J., Pinzon, J.E., Leimgruber, P., Dubayah, R.O., Hurtt, G.C., Böhning-Gaese, K., & Fagan, W. (2014). Human Land-Use Practices Lead to Global Long-Term Increases in Photosynthetic Capacity. *Remote Sensing*, 6(6), 5717-5731. <https://doi.org/10.3390/rs6065717>

- Muñoz-Rojas, M., De la Rosa, D., Zavala, L.M., Jordán, A., & Anaya-Romero, M. (2011). Changes in land cover and vegetation carbon stocks in Andalusia, Southern Spain (1956-2007). *Science of the Total Environment*, 409(14), 2796-2806. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.04.009>
- Myneni, R.B., Hall, F.G., Sellers, P.J., & Marshak, A.L. (1995). The interpretation of spectral vegetation indexes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(2), 481-486. <https://doi.org/10.1109/36.377948>
- Naranjo Ramírez, J. (2003). El campo andaluz. Cultivos y aprovechamientos en Andalucía. In *Geografía de Andalucía* (pp. 523-548). Ariel.
- Neeti, N., & Eastman, J.R. (2011). A Contextual Mann-Kendall Approach for the Assessment of Trend Significance in Image Time Series. *Transactions in GIS*, 15(5), 599-611. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2011.01280.x>
- Neigh, C., Tucker, C., & Townshend, J. (2008). North American vegetation dynamics observed with multi-resolution satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 112(4), 1749-1772. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.08.018>
- Novillo, C.J., Arrogante-Funes, P., & Romero-Calcerrada, R. (2019). Recent NDVI trends in mainland Spain: Land-cover and phytoclimatic-type implications. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(1), 5-7. <https://doi.org/10.3390/ijgi8010043>
- Olson, D. M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E.D., Burgess, N.D., Powell, G.V.N., Underwood, E.C., D'Amico, J.A., Itoua, I., Strand, H.E., Morrison, J.C., Loucks, C.J., Allnutt, T.F., Ricketts, T.H., Kura, Y., Lamoreux, J.F., Wettengel, W.W., Hedao, P., & Kassem, K.R. (2001). Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth. A new global map of terrestrial ecoregions provides an innovative tool for conserving biodiversity. *BioScience*, 51(11), 933-938. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0933:teotwa\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0933:teotwa]2.0.co;2)
- Olsson, L., Eklundh, L., & Ardö, J. (2005). A recent greening of the Sahel - Trends, patterns and potential causes. *Journal of Arid Environments*, 63(3), 556-566. <https://doi.org/10.1016/j.JARIDENV.2005.03.008>
- Palmero-iniesta, M., Espelta, J. M., Padial-iglesias, M., González-Guerrero, Ò., Pesquer, L., Domingo-Marimon, C., Ninyerola, M., Pons, X., & Pino, J. (2021). The role of recent (1985–2014) patterns of land abandonment and environmental factors in the establishment and growth

of secondary forests in the iberian peninsula. *Land*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/land10080817>

Paniza Cabrera, A., García Martínez, P., & Sánchez Martínez, J.D. (2015). Análisis de la expansión del olivar en la provincia de Jaén a través de fuentes cartográficas (1956-2007). *Anales de Geografía de La Universidad Complutense*, 35(1). https://doi.org/10.5209/rev_AGUC.2015.v35.n1.48966

Páscoa, P., Russo, A., Gouveia, C. M., Soares, P.M.M., Cardoso, R.M., Careto, J.A.M., & Ribeiro, A.F.S. (2021). A high-resolution view of the recent drought trends over the Iberian Peninsula. *Weather and Climate Extremes*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100320>

Pei, H., Liu, M., Jia, Y., Zhang, H., Li, Y., & Xiao, Y. (2021). The trend of vegetation greening and its drivers in the Agro-pastoral ecotone of northern China, 2000–2020. *Ecological Indicators*, 129. <https://doi.org/10.1016/j.ECOLIND.2021.108004>

Pereira, S.C., Carvalho, D., & Rocha, A. (2021). Temperature and precipitation extremes over the iberian peninsula under climate change scenarios: A review. *Climate*, 9(9). <https://doi.org/10.3390/cli9090139>

Pettorelli, N., Vik, J.O., Mysterud, A., Gailard, J.M., Tucker, C.J., & Stenseth, N.C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology and Evolution*, 20(9), 503-510. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>

Piao, S., Yin, G., Tan, J., Cheng, L., Huang, M., Li, Y., Liu, R., Mao, J., Myneni, R.B., Peng, S., Poulter, B., Shi, X., Xiao, Z., Zeng, N., Zeng, Z., & Wang, Y. (2015). Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years. *Global Change Biology*, 21(4), 1601-1609. <https://doi.org/10.1111/GCB.12795>

Pita López, M. (2003). El clima de Andalucía. In *Geografía de Andalucía* (pp. 137-173). Ariel.

R Core Team. (2021). R: A language and environment for statistical computing. *R Foundation for Statistical Computing*. Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>

Reddy, D.S., & Prasad, P.R.C. (2018). Prediction of vegetation dynamics using NDVI time series data and LSTM. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4(1), 409-419. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0431-3>

Resco de Dios, V., Cunill Camprubí, À., Pérez-Zanón, N., Peña, J.C., Martínez del Castillo, E., Rodrigues M., Yao, Y., Yebra, M., Vega-García, C., & Boer, M.M. (2022). Convergence in critical fuel moisture and fire weather thresholds associated with fire activity in the pyroregions of

Mediterranean Europe. *Science of The Total Environment*, 806, 151462. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151462>

Resco de Dios, V., Fischer, C., & Colinas, C. (2006). Climate Change Effects on Mediterranean Forests and Preventive Measures. *New Forests*, 33(1), 29-40. <https://doi.org/10.1007/s11056-006-9011-x>

Roerink, G.J., Menenti, M., Soepboer, W., & Su, Z. (2003). Assessment of climate impact on vegetation dynamics by using remote sensing. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28(1-3), 103-109. [https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(03\)00011-1](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(03)00011-1)

Roerink, G.J., Menenti, M., & Verhoef, W. (2000). Reconstructing cloudfree NDVI composites using Fourier analysis of time series. *International Journal of Remote Sensing*, 21(9), 1911-1917. <https://doi.org/10.1080/014311600209814>

Romero, J., & Olcina Cantos, J. (2021). *Cambio Climático en el Mediterráneo. Procesos, riesgos y políticas*. Tirant lo Blanch.

Rouse, J., Haas, R., & Schell, J. (1974). *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation*. Texas A&M Univ. College Station. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022555>

Rubio Recio, J.M. (1989). *Biogeografía. Paisajes vegetales y vida animal*. Síntesis.

Rubio Recio, J.M. (1992). Biogeografía. In *Geografía física* (pp. 425-578). Cátedra.

Sala, M., & Batalla, R.J. (1999). *Teoría y métodos en geografía física*. Síntesis.

Sánchez Martínez, J.D., Gallego Simón, V.J., & Araque Jiménez, E. (2011). El olivar andaluz y sus transformaciones recientes. *Estudios Geográficos*, 72(270), 203-229. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201109>

Schut, A.G.T., Ivits, E., Conijn, J.G., Brink, B. ten, & Fensholt, R. (2015). Trends in global vegetation activity and climatic drivers indicate a decoupled response to climate change. *PLoS ONE*, 10(10), 1-21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138013>

Sen, P. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal Of the American Statistical Association*, 63, 1379-1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>

- Slayback, D.A., Pinzon, J.E., Los, S.O., & Tucker, C.J. (2003). Northern hemisphere photosynthetic trends 1982-99. *Global Change Biology*, 9(1), 1-15. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00507.x>
- Strahler, A.H. (2013). *Introducing Physical Geography*. Wiley, 6th Edition.
- Theil, H. (1950). A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis I, II and III. *Proceedings of the Section of Sciences. Koninklijke Academie van Wetenschappen Te, Series A Mathematical Sciences*, 53, 386-392, 521-525, 1397-1412. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-011-2546-8_20
- Tomas-Burguera, M., Beguería, S., & Vicente-Serrano, S.M. (2021). Climatology and trends of reference evapotranspiration in Spain. *International Journal of Climatology*, 41(S1). <https://doi.org/10.1002/joc.6817>
- Tucker, C.J., Slayback, D.A., Pinzon, J.E., Los, S.O., Myneni, R.B., & Taylor, M. G. (2001). Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999. *International Journal of Biometeorology*, 45(4), 184-190. <https://doi.org/10.1007/s00484-001-0109-8>
- Valdés, C., & Gil Sánchez, L. (1998). La transformación histórica del paisaje forestal en España. In *Inventario Forestal Nacional* (pp. 11-104). Ministerio de Medio Ambiente.
- Vicente-Serrano, S. M., Martín-Hernández, N., Reig, F., Azorin-Molina, C., Zabalza, J., Beguería, S., Domínguez-Castro, F., El Kenawy, A., Peña-Gallardo, M., Noguera, I., & García, M. (2020). Vegetation greening in Spain detected from long term data (1981–2015). *International Journal of Remote Sensing*, 41(5), 1709-1740. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1674460>
- Vidal-Macua, J., Ninyerola, M., Zabala, A., Domingo-Marimon, C., & Pons, X. (2017). Factors affecting forest dynamics in the Iberian Peninsula from 1987 to 2012. The role of topography and drought. *Forest Ecology and Management*, 406, 290-306. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.10.011>
- Vigil-Villodres, A. (2021). Extractivismo Agrario e Industria Agroalimentaria en Andalucía. *Anduli*, 20, 35-58. <https://doi.org/10.12795/anduli.2021.i20.03>
- Wasserstein, R.L., & Lazar, N.A. (2016). The ASA's Statement on p-Values: Context, Process, and Purpose. *The American Statistician*, 70(2), 129-133. <https://doi.org/10.1080/00031305.2016.1154108>

- Xiao, J., & Moody, A. (2004). Trends in vegetation activity and their climatic correlates: China 1982 to 1998. *International Journal of Remote Sensing*, 25(24), 5669-5689. <https://doi.org/10.1080/01431160410001735094>
- Yang, Y., Wang, S., Bai, X., Tan, Q., Li, Q., Wu, L., Tian, S., Hu, Z., Li, S., & Deng, Y. (2019). Factors affecting long-term trends in global NDVI. *Forests*, 10(5), 1-17. <https://doi.org/10.3390/f10050372>
- Yus Ramos, R. (2020). *La burbuja de los cultivos subtropicales y el colapso hídrico de la Axarquía*. Gabinete de Estudios de la Naturaleza de la Axarquía.
- Zhang, X., Friedl, M.A., Schaaf, C.B., Strahler, A.H., Hodges, J.C.F., Gao, F., Reed, B.C., & Huete, A. (2003). Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84(3), 471-475. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00135-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00135-9)
- Zhou, L., Tucker, C.J., Kaufmann, R.K., Slayback, D., Shabanov, N.V., & Myneni, R.B. (2001). Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D17), 20069-20083. <https://doi.org/10.1029/2000JD000115>
- Zhu, Z., Piao, S., Myneni, R.B., Huang, M., Zeng, Z., Canadell, J.G., Ciais, P., Sitch, S., Friedlingstein, P., Arneth, A., Cao, C., Cheng, L., Kato, E., Koven, C., Li, Y., Lian, X., Liu, Y., Liu, R., Mao, J., Pan, Y., Peng, S., Peñuelas, J., ... & Zeng, N. (2016). Greening of the Earth and its drivers. *Nature Climate Change*, 6(8), 791-795. <https://doi.org/10.1038/nclimate3004>