

Phenological variation and greening of the Monarch Butterfly Biosphere Reserve (2000-2019)

Variación fenológica y enverdecimiento de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (2000-2019)

María L. España-Boquera; Omar Champo-Jiménez ; María D. Uribe-Salas*

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales. Posta veterinaria, carretera Morelia-Zinapécuaro. C. P. 58880. Tarímbaro, Michoacán, México.
*Corresponding author: maria.uribe@umich.mx; tel.: +52 443 322 3500.

Abstract

Introduction: The *Abies* forest of the Monarch Butterfly Biosphere Reserve (MBBR) is a key ecosystem for the butterfly *Danaus plexippus* L. The study of this habitat is essential to understand the global effects of environmental transformation.

Objectives: To study the impact of climate change over the last 20 years (2000-2019) on the MBBR, to (1) describe variations in climate and phenology; (2) analyze the relationships between LAI (leaf area index) and climate; and (3) estimate greening

Materials and methods: Monthly mean temperature and precipitation values from the NASA Giovanni database and the Copernicus LAI series were analyzed. Using the TIMESAT algorithm, 11 phenological variables per pixel and year were determined and the annual spatial average of each one was calculated for each type of land cover (pine, oyamel, shrubs and crops) and the cumulative increase of the extended integral (greening).

Results and discussion: Mean temperature increased 0.87 °C in 2000-2019. Beginning, middle, and end of the season have occurred progressively earlier, and cumulative leaf area, as well as minimum and maximum LAI, have increased. Greening was recorded in 53.21 % of the MBBR and browning in 33.97 %.

Conclusion: The increase in mean temperature affects phenology of MBBR, causing longer growing seasons and net greening of the area.

Keywords: *Abies religiosa*; temperate forest; climate change; leaf area index; growing season; time series.

Resumen

Introducción: El bosque de *Abies* de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM) es un ecosistema vital para la mariposa *Danaus plexippus* L. El estudio de este hábitat es fundamental para entender los efectos globales de la transformación ambiental.

Objetivos: Estudiar el impacto del cambio climático de los últimos 20 años (2000-2019) en la RBMM, para (1) describir las variaciones del clima y de la fenología; (2) analizar las relaciones entre LAI (índice de área foliar) y clima; y (3) estimar el enverdecimiento.

Materiales y métodos: Se analizaron los valores mensuales de temperatura media y precipitación de la base Giovanni de la NASA y la serie LAI de Copernicus. Con el algoritmo TIMESAT se obtuvieron 11 variables fenológicas por píxel y año y se obtuvo el promedio espacial anual de cada una para cada tipo de cobertura (pino, oyamel, arbustos y cultivos) y el incremento acumulado de la integral extendida (enverdecimiento).

Resultados y discusión: La temperatura media aumentó 0.87 °C en 2000-2019. El inicio, mitad y final de estación han ocurrido progresivamente más temprano, y el área foliar acumulada, así como el LAI mínimo y máximo, han aumentado. El enverdecimiento se registró en 53.21 % de la RBMM y el pardeamiento en 33.97 %.

Conclusión: El aumento de la temperatura media afecta la fenología de la RBMM, provocando estaciones de crecimiento más largas y enverdecimiento neto de la zona.

Palabras clave:

Abies religiosa; bosque templado; cambio climático; índice de área foliar; estación de crecimiento; series temporales.

Introduction

The atmosphere, geosphere, and biosphere have been driven by humans beyond the typical conditions of the current interglacial epoch (Buitenwerf, Sandel, Normand, Mimet, & Svenning, 2018), directing the planet towards a different stage, the Anthropocene (Arias-Maldonado, 2018), which main manifestation is global changes in the original vegetation (Buitenwerf et al., 2018). Greening of the Earth has been the most distinctive effect in the last 30 years (Zeng, Peng, & Piao, 2018). Greening and browning are defined, respectively, as statistically significant increases and decreases in the average annual green leaf area at a location over a period; globally, it is estimated that one-third of vegetated areas are greening and 5% are browning (Chen et al., 2019). The main causes of vegetation increase are climate, in addition to the increase in CO₂ concentration, N deposition, oscillation of atmospheric variables (Gao, Liang, & He, 2019) and land use change (Forzieri, Alkama, Miralles, & Cescatti, 2017; Zeng et al., 2018).

Changes in vegetation physiology and structure associated with greening can affect the global energy balance and fluxes of major elements, including carbon, nitrogen, and water; they can also regulate surface temperatures by affecting exchanges between the Earth and the atmosphere (Buitenwerf et al., 2018; Forzieri et al., 2017; Zeng et al., 2018). Effects on global water cycle occur through modification of terrestrial evapotranspiration leading to cooling of the Earth's surface, recycling of atmospheric precipitation (Zeng et al., 2018) and regulation of soil moisture, which affects plant functioning (Buitenwerf et al., 2018; Montgomery, Rice, Stefanski, Rich, & Reich, 2020). Thereby, positive feedback occurs in the terrestrial climate system that amplifies the biophysical impacts of greening on surface energy fluxes (Forzieri et al., 2017). Greening has mitigated 12 % of global warming of the Earth's surface over the past 30 years (Zeng et al., 2017), which exceeds recent estimates of climate warming caused by deforestation (Forzieri et al., 2017). The interaction between vegetation and climate is largely driven by the impact of vegetation on temperature and not vice versa (Forzieri et al., 2018).

Repeated and consistent satellite observations have recently been used to assess biophysical impacts of land cover transitions on global climate (Forzieri et al., 2017). Indices such as LAI (Leaf Area Index), NDVI (Normalised Difference Vegetation Index) and NPP (Net Primary Production) are derived from satellite observations since the 1980s (Buitenwerf et al., 2018; Cui et al., 2018). LAI is a key structural parameter of vegetation that largely estimates the result of Earth-climate interactions and feedbacks (Forzieri et al., 2017). According to Zeng et al. (2018), global LAI increased

Introducción

Los seres humanos han llevado a la atmósfera, la geósfera y la biósfera más allá de las condiciones típicas de la actual época interglaciar (Buitenwerf, Sandel, Normand, Mimet, & Svenning, 2018), dirigiendo al planeta hacia un estado diferente, el Antropoceno (Arias-Maldonado, 2018), cuya principal manifestación son los cambios globales en la vegetación original (Buitenwerf et al., 2018). El enverdecimiento de la Tierra ha sido el efecto más distintivo en los últimos 30 años (Zeng, Peng, & Piao, 2018). El enverdecimiento (*greening*) y el pardeamiento (*browning*) se definen, respectivamente, como aumentos y disminuciones estadísticamente significativos en el promedio anual del área foliar verde en un lugar durante un período; se calcula que, a nivel global, un tercio de las áreas con vegetación está enverdeciendo y 5 % está pardeando (Chen et al., 2019). Las principales causas del aumento de la vegetación son climáticas, además del aumento en la concentración de CO₂, el depósito de N, la oscilación de las variables atmosféricas (Gao, Liang, & He, 2019) y el cambio en el uso de suelo (Forzieri, Alkama, Miralles, & Cescatti, 2017; Zeng et al., 2018).

Los cambios en la fisiología y la estructura de la vegetación asociados al enverdecimiento pueden afectar al balance global de energía y los flujos de los principales elementos, incluyendo carbono, nitrógeno y agua; también pueden regular las temperaturas de la superficie al afectar los intercambios entre la Tierra y la atmósfera (Buitenwerf et al., 2018; Forzieri et al., 2017; Zeng et al., 2018). Los efectos en el ciclo global del agua se dan a través de la modificación de la evapotranspiración terrestre que provoca el enfriamiento de la superficie de la Tierra, el reciclaje de precipitaciones atmosféricas (Zeng et al., 2018) y la regulación de la humedad del suelo, lo que afecta el funcionamiento de las plantas (Buitenwerf et al., 2018; Montgomery, Rice, Stefanski, Rich, & Reich, 2020). De esta forma, se produce una retroalimentación positiva en el sistema de clima terrestre que amplifica los impactos biofísicos del enverdecimiento en los flujos de energía de superficie (Forzieri et al., 2017). El enverdecimiento ha mitigado 12 % el calentamiento global de la superficie de la Tierra en los últimos 30 años (Zeng et al., 2017), lo que supera las estimaciones recientes del calentamiento climático provocado por la deforestación (Forzieri et al., 2017). La interacción entre vegetación y clima está impulsada en gran medida por el impacto de la vegetación en la temperatura y no viceversa (Forzieri et al., 2018).

Recientemente se han utilizado observaciones satelitales repetidas y consistentes para evaluar los impactos biofísicos de las transiciones de la cubierta terrestre en el clima global (Forzieri et al., 2017). Índices como el LAI (Leaf Area Index), el NDVI (Normalised

significantly 8 % between 1982 and 2011 with net leaf area increase of 2.3 % per decade (Chen et al., 2019) and a statistically significant positive trend in 46 % of the global vegetated surface (Forzieri et al., 2017).

Plant phenology is closely related to seasonal changes in temperature, available humidity and radiation, and this seasonality affects the availability of food for migratory animals and breeding processes (Vrieling et al., 2018). This could be the case of monarch butterflies that, coming from the United States and Canada, arrive annually to the Monarch Butterfly Biosphere Reserve (MBBR) to spend the winter season. However, populations of this lepidopteran have decreased in recent years (Leverkus, Jaramillo-López, Brower, Lindenmayer, & Williams, 2017); this is coupled with the effect that global climate change may be having on the forest.

The objective of this work was to study the impact of climate change over the last 20 years (2000-2019) in the MBBR, based on the analysis of the GEOV1 series of LAI from the European Copernicus program (Baret et al., 2013), to (1) describe variations in climate and phenology; (2) analyze the relationships between LAI and climate; and (3) estimate greening.

Materials and methods

Study area

The MBBR, winter refuge of the butterfly *Danaus plexippus* L., is located between the states of Michoacán and Estado de México (100.16°-100.37° W and 19.32°-19.75° N) in the physiographic province Neovolcanic Axis. The surface area is 56 259 ha. The climate is temperate sub-humid with summer rainfall, mean annual precipitation of 830 mm and mean annual temperature of 15.7 °C. Elevations range from 1 800 to 3 640 m with steep slopes. At lower elevations, the vegetation is representative of a temperate *Pinus-Quercus* forest and there are agricultural plots, mainly rainfed; at higher elevations oyamel forest (*Abies religiosa* [Kunth] Schltdl. & Cham.) can be found, being habitat of the monarch butterfly, with patches of grasslands and shrublands (Giménez de Azcárate, Ramírez, & Pinto, 2003). Based on España-Boquera, Champo-Jiménez, and Uribe-Salas (2019), four land cover types were considered in the present study: pine, oyamel, shrub grassland, and crops (Figure 1).

Climate variables

Mean temperature (°C) and precipitation ($m^3 \cdot m^{-2}$) values for the study area, corresponding to the period 2000-2019, were downloaded from the NASA Giovanni page (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni>). Data are monthly with 0.25° of spatial resolution (considering

Difference Vegetation Index) y el NPP (Net Primary Production) se derivan de observaciones satelitales desde la década de 1980 (Buitenwerf et al., 2018; Cui et al., 2018). El LAI es un parámetro estructural clave de la vegetación que estima en gran medida el resultado de las interacciones y retroalimentaciones de la Tierra y el clima (Forzieri et al., 2017). De acuerdo con Zeng et al. (2018), el LAI global aumentó significativamente 8 % entre 1982 y 2011 con incremento neto del área foliar del 2.3 % por década (Chen et al., 2019) y una tendencia positiva estadísticamente significativa en 46 % de la superficie vegetal mundial (Forzieri et al., 2017).

La fenología de las plantas tiene estrecha relación con los cambios estacionales de la temperatura, la humedad disponible y la radiación, y esta temporalidad afecta la disponibilidad de comida para los animales migratorios y los procesos de cría (Vrieling et al., 2018). Este podría ser el caso de las mariposas monarca que, provenientes de Estados Unidos y Canadá, llegan anualmente a la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM) para pasar el invierno. No obstante, las poblaciones de este lepidóptero han disminuido en los últimos años (Leverkus, Jaramillo-López, Brower, Lindenmayer, & Williams, 2017); a esto se une el efecto que el cambio climático global pueda estar teniendo en el bosque.

El objetivo de este trabajo fue estudiar el impacto del cambio climático de los últimos 20 años (2000-2019) en la RBMM, a partir del análisis de la serie GEOV1 de LAI del programa europeo Copernicus (Baret et al., 2013), para (1) describir las variaciones del clima y de la fenología; (2) analizar las relaciones entre LAI y clima; y (3) estimar el enverdecimiento.

Materiales y métodos

Zona de estudio

La RBMM, refugio invernal de la mariposa *Danaus plexippus* L., se encuentra entre los estados de Michoacán y México (100.16°-100.37° O y 19.32°-19.75° N) en la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico. La superficie es de 56 259 ha. El clima es templado subhúmedo con lluvias en verano, precipitación media anual de 830 mm y temperatura media anual de 15.7 °C. Las elevaciones van de 1 800 a 3 640 m con fuertes pendientes. En las zonas de menor elevación, la vegetación es característica de un bosque templado de *Pinus-Quercus* y hay parcelas agrícolas, principalmente de temporal; en las de mayor elevación se encuentra el bosque de oyamel (*Abies religiosa* [Kunth] Schltdl. & Cham.), hábitat de la mariposa monarca, con manchones de pastizales y zonas arbustivas (Giménez de Azcárate, Ramírez, & Pinto, 2003). Con base en España-Boquera, Champo-Jiménez, y Uribe-Salas (2019), en el presente estudio se consideraron cuatro tipos de cobertura: pino, oyamel, pastizal arbustos y cultivos (Figura 1).

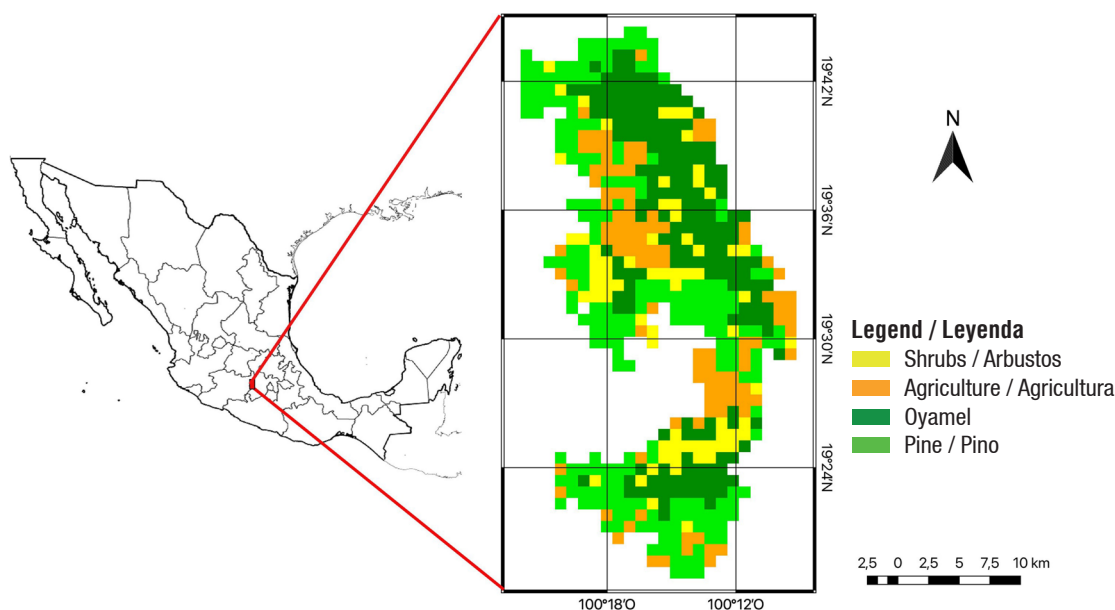


Figure 1. Land cover types in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve.

Figura 1. Tipos de cobertura de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca.

that 360° equals to 40 075 km and corresponds to a spatial resolution of 27.83 km² at the equator). To cover the study area, four pixels were downloaded and the average of the four data was calculated for each variable. The average of temperature was calculated for each year of the series, as well as the average of each month in the period; the annual total was calculated for the precipitation. The frequency of the data provided a monthly, seasonal and interannual scale for analysis.

LAI time series

GEOV1 series of LAI for the period 2000-2019, developed from SPOT/VGT data within the Copernicus project of the Global Monitoring for Environment and Security (GMES) program of the European Union, with 0.05° spatial resolution (1 km at the Equator) and 10-day steps, (Baret et al., 2013), were downloaded and analyzed. The study area was clipped and the mask corresponding to the MBBR was applied.

Phenological variables

From the LAI series, using the TIMESAT algorithm (with Savitsky-Golay adaptive filter, 20 % window size, one season per year and two iterations; Jönsson & Eklundh, 2004), 11 phenological variables describing the annual phenology of the vegetation were determined per pixel and year: beginning, middle, end and season length, maximum and minimum LAI, LAI amplitude, left and right derivatives (growth rate and decay rates), extended and short integral (total and annual cumulative LAI). The spatial average of each phenological variable was

Variables climáticas

Los valores de temperatura media (°C) y precipitación (m³·m⁻²) de la zona de estudio, correspondientes al periodo 2000-2019, se descargaron de la página Giovanni de la NASA (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni>). Los datos son mensuales y tienen 0.25° de resolución espacial (considerando que 360° equivalen a 40 075 km y corresponden a una resolución espacial de 27.83 km² en el Ecuador). Para cubrir la zona de estudio se descargaron cuatro píxeles y se calculó el promedio de los cuatro datos en cada variable. El promedio de cada variable se calculó para cada año de la serie, así como el promedio de cada mes en el periodo; para la precipitación se calculó el total anual. La frecuencia de los datos permitió analizarlos a escala mensual, estacional e interanual.

Serie de tiempo de LAI

Se descargó y analizó la serie GEOV1 de LAI para el periodo 2000-2019, desarrollada dentro del proyecto Copernicus del programa Global Monitoring for Environment and Security (GMES) de la Unión Europea, con 0.05° de resolución espacial (1 km en el Ecuador) y pasos de 10 días, a partir de datos SPOT/VGT (Baret et al., 2013). La zona de estudio se recortó y se aplicó la máscara correspondiente a la RBMM.

Variables fenológicas

A partir de la serie de LAI, utilizando el algoritmo TIMESAT (con filtro adaptativo Savitsky-Golay, tamaño

determined for the total MBBR and for each land cover type (oyamel, pine, shrubs, and crops) in each year.

Greening

Greening was spatially detected by the cumulative increase of the extended integral, calculated as the sum of the differences between the extended integral of each year and the interannual average of the pixel land cover type. Positive or negative pixels correspond respectively to areas in which the total cumulative leaf area in the period has been greater or less than the average of the land cover. In the same way, the cumulative increase of the short integral was calculated by summing the differences between the short integral of each year and the interannual average of the pixel land cover type. Positive or negative pixels correspond to areas in which the increase in leaf area for each year has been greater or less than the average for their cover type.

Results and Discussion

Climate

The mean annual temperature and annual accumulated precipitation in the period 2000-2019 are shown in Figure 2. The mean temperature increased $0.87\text{ }^{\circ}\text{C}$ in the 20 years studied ($0.04\text{ }^{\circ}\text{C}$ on average each year, $R^2 = 0.20$), a value close to that calculated by the GMST (Global Mean Surface Temperature) of up to $0.89\text{ }^{\circ}\text{C}$ during 1901-2012 (IPCC AR5, 2013). The year 2010 was the coldest, while 2014 and 2015 were the warmest. Meanwhile, accumulated precipitation remained stable.

Figure 3 shows the average temperature and precipitation for each month in each year. In summary, in 2000, the spring was rainier and cooler, while the

de ventana de 20 %, estación por año y dos iteraciones; Jönsson & Eklundh, 2004), se obtuvieron 11 variables fenológicas por pixel y año que describen la fenología anual de la vegetación: inicio, mitad, final y longitud de estación, LAI máximo y mínimo, amplitud del LAI, derivadas izquierda y derecha (velocidad de crecimiento y decaimiento), integral extendida y corta (LAI acumulado total y anual). El promedio espacial de cada variable fenológica se obtuvo para el total de la RBMM y para cada cobertura considerada (oyamel, pino, arbustos y cultivos) en cada año.

Enverdecimiento

El enverdecimiento se detectó espacialmente mediante el incremento acumulado de la integral extendida, calculado como la suma de las diferencias entre la integral extendida de cada año y el promedio interanual de la cobertura a la que pertenece el píxel. Los píxeles positivos o negativos corresponden a zonas en las que el área foliar total acumulada en el periodo ha sido mayor o menor al promedio de su cobertura. Del mismo modo, el incremento acumulado de la integral corta se calculó mediante la suma de las diferencias entre la integral corta de cada año y el promedio interanual de la cobertura a la que pertenece el píxel. Los píxeles positivos o negativos corresponden a zonas en las que el incremento del área foliar de cada año ha sido mayor o menor al promedio de su cobertura.

Resultados y discusión

Clima

La temperatura media anual y la precipitación acumulada anualmente en el periodo 2000-2019 se muestran en la Figura 2. La temperatura media aumentó $0.87\text{ }^{\circ}\text{C}$ en los 20 años estudiados ($0.04\text{ }^{\circ}\text{C}$ en

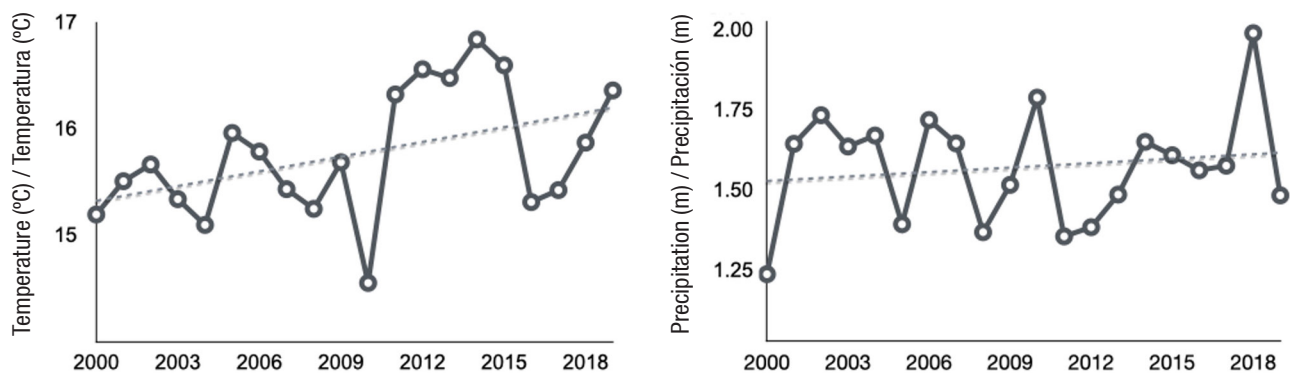


Figure 2. Mean annual temperature and annual accumulated precipitation in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve during the period 2000-2019. Dotted lines indicate the trend generated from Giovanni data (NASA).

Figura 2. Temperatura media anual y precipitación acumulada anualmente en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca durante el periodo 2000-2019. Las líneas punteadas indican la tendencia generada a partir de datos Giovanni (NASA).

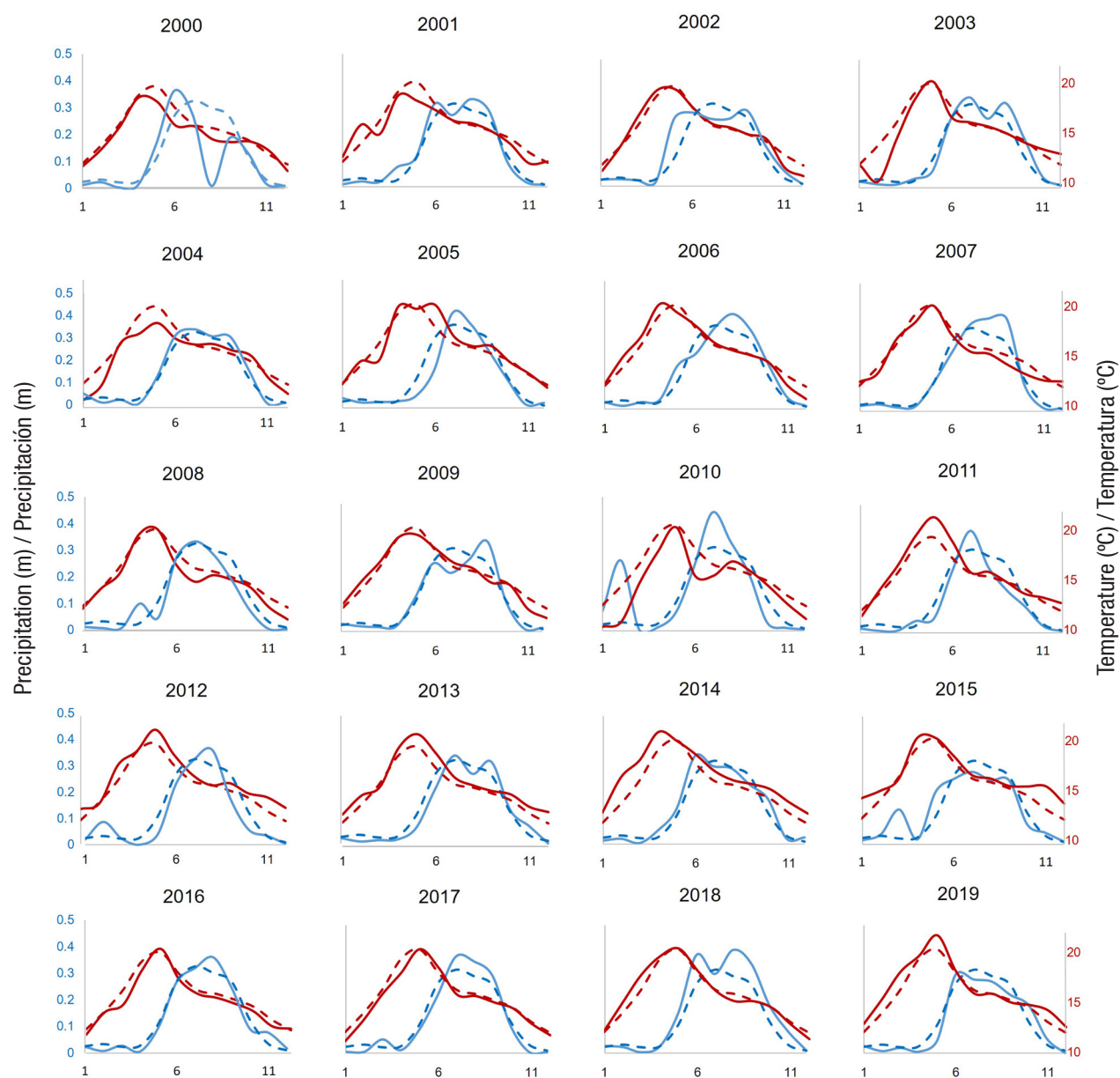


Figure 3. Monthly temperature and precipitation for each year of the period 2000-2019 in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve. The dashed line indicates the interannual monthly average.

Figura 3. Temperatura y precipitación mensual de cada año del periodo 2000-2019 en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca. La línea de guiones indica el promedio mensual interanual.

summer was drier and cooler. In 2001, late winter was warm, spring was cold and rainy, summer started rainy, and winter started cold. In 2002, spring was warm and rainy, summer was less rainy, and winter was cold and rainy. In 2003, winter was cold, as was early spring; summer was rainy with a period of haze; and autumn was warm and rainy. In 2004, winter, spring and early summer were cold, October was rainy and November was dry. In 2005, spring started cold, but ended warm; summer was warm, started dry and then was rainy; and autumn started warm. In 2006, the winter ended warm and the spring was warm; the

promedio cada año, $R^2 = 0.20$), valor cercano al calculado por el GMST (Global Mean Surface Temperature) de hasta $0.89\text{ }^\circ\text{C}$ durante 1901-2012 (IPCC AR5, 2013). El año 2010 fue el más frío, mientras que 2014 y 2015 fueron los más cálidos. Por su parte, la precipitación acumulada se mantuvo estable.

La Figura 3 muestra la temperatura media y la precipitación de cada mes en cada año. En resumen, en el año 2000, la primavera fue más lluviosa y fresca, mientras que el verano fue más seco y frío. En el 2001, el final del invierno fue cálido, la primavera fue fría y

fall was rainy and the winter was cold. In 2007, the fall started rainy and was cold. In 2008, early spring was rainy, summer was cool and ended dry. In 2009, winter ended warm; summer was warm and dry, but ended rainy; autumn was cool and started rainy, then was dry. In 2010, winter was very cold and rainy; spring started cold and May was warm; summer started cold and very rainy, but ended warm; and autumn was dry. In 2011, spring and summer were warm; autumn was dry and cold; and winter was warm. 2012 was warm with rainy winter and dry spring and fall. 2013 was warm with dry winter and spring and rainy autumn. 2014 was warm with rainy spring, summer and autumn. 2015 was warm with rainy late winter and early spring and dry summer and fall. 2016 was a cool year; summer ended rainy, fall was dry and winter started rainy. In 2017, winter ended rainy and cold, spring was warm and dry, summer was cold and late rainy, and fall was dry. In 2018, late winter and early spring were warm, late spring and early summer and autumn were rainy. In 2019, winter and spring were warm, summer was rainy, autumn was rainy and warm, and winter was warm and dry.

Phenological variables

The average annual value of each phenological variable in the MBBR (2000-2019) and the associated regression line are shown in Figure 4. The results indicate that the beginning ($R^2 = -0.85$), middle ($R^2 = -0.92$) and end ($R^2 = -0.94$) of season have gradually occurred earlier; minimum ($R^2 = 0.89$) and maximum ($R^2 = 0.55$) LAI have been increasing, as well as total cumulative leaf area ($R^2 = 0.59$) and season length ($R^2 = 0.24$).

Figure 5 shows the average annual value of each phenological variable in each land cover of the MBBR. In all variables, the crops had a more differentiated temporal behavior with faster start and decay of the growing season and shorter season than in the other coverages, with oyamel having greater interannual variability.

The beginning, end and middle of the growing season are increasingly earlier in the order of ten tens of days from the beginning to the end of the studied period: the beginning of season moves from May (15th ten) to the beginning of the year, while the end of season moves from November (33rd ten) to August (23rd ten) and the mid-season moves from August (23rd ten) to April (13th ten). Although crops follow the tendency to move forward, they show greater interannual stability than natural cover types, as planting and harvesting dates are largely independent of the weather and dependent on human will. The minimum LAI is very low in crops, which is explained by the prevalence of annual rainfed crops. On the other hand, shrubs

lluviosa, el verano inició lluvioso y el invierno inició frío. En 2002, la primavera fue cálida y lluviosa, el verano fue menos lluvioso y el invierno fue frío y lluvioso. En 2003, el invierno fue frío, así como el inicio de la primavera; el verano fue lluvioso con un periodo de calma; y el otoño fue cálido y lluvioso. En 2004, el invierno, la primavera y el inicio del verano fueron fríos, octubre fue lluvioso y noviembre fue seco. En 2005, la primavera inició fría, pero terminó cálida; el verano fue cálido, inició seco y después fue lluvioso; y el otoño inició cálido. En 2006, el invierno terminó cálido y la primavera fue cálida; el otoño fue lluvioso y el invierno frío. En 2007, el otoño inició lluvioso y fue frío. En 2008, el inicio de la primavera fue lluvioso, el verano fue fresco y terminó seco. En 2009, el invierno terminó cálido; el verano fue cálido y seco, pero terminó lluvioso; el otoño fue frío e inició lluvioso, después fue seco. En 2010, el invierno fue muy frío y lluvioso; la primavera inició fría y mayo fue cálido; el verano inició frío y muy lluvioso, pero terminó cálido; y el otoño fue seco. En 2011, la primavera y el verano fueron cálidos; el otoño fue seco y frío, y el invierno fue cálido. 2012 fue un año cálido con invierno lluvioso y primavera y otoño secos. 2013 fue cálido con invierno y primavera secos y otoño lluvioso. 2014 fue cálido con primavera, verano y otoño lluviosos. 2015 fue cálido con final de invierno e inicio de primavera lluviosos y verano y otoño secos. 2016 fue un año frío; el verano terminó lluvioso, el otoño fue seco y el invierno inició lluvioso. En 2017, el invierno terminó lluvioso y frío, la primavera fue cálida y seca, el verano fue frío y tardíamente lluvioso, y el otoño fue seco. En 2018, el final de invierno y el inicio de la primavera fueron cálidos, el final de la primavera y el inicio del verano y otoño fueron lluviosos. En 2019, el invierno y la primavera fueron cálidos, el verano fue lluvioso, el otoño fue lluvioso y cálido, y el invierno fue cálido y seco.

Variables fenológicas

El valor promedio anual de cada variable fenológica en la RBMM (2000-2019) y la recta de ajuste asociada se muestran en la Figura 4. Los resultados indican que el inicio ($R^2 = -0.85$), mitad ($R^2 = -0.92$) y final ($R^2 = -0.94$) de estación han ocurrido gradualmente más temprano; el LAI mínimo ($R^2 = 0.89$) y máximo ($R^2 = 0.55$) han ido aumentando, así como la superficie foliar total acumulada ($R^2 = 0.59$) y la longitud de estación ($R^2 = 0.24$).

La Figura 5 muestra el valor promedio anual de cada variable fenológica en cada cobertura de la RBMM. En todas las variables, los cultivos presentaron un comportamiento temporal más diferenciado con arranque y decaimiento de la estación de crecimiento más rápidos y estación más corta que en las otras coberturas, de las cuales, el oyamel tuvo mayor variabilidad interanual.

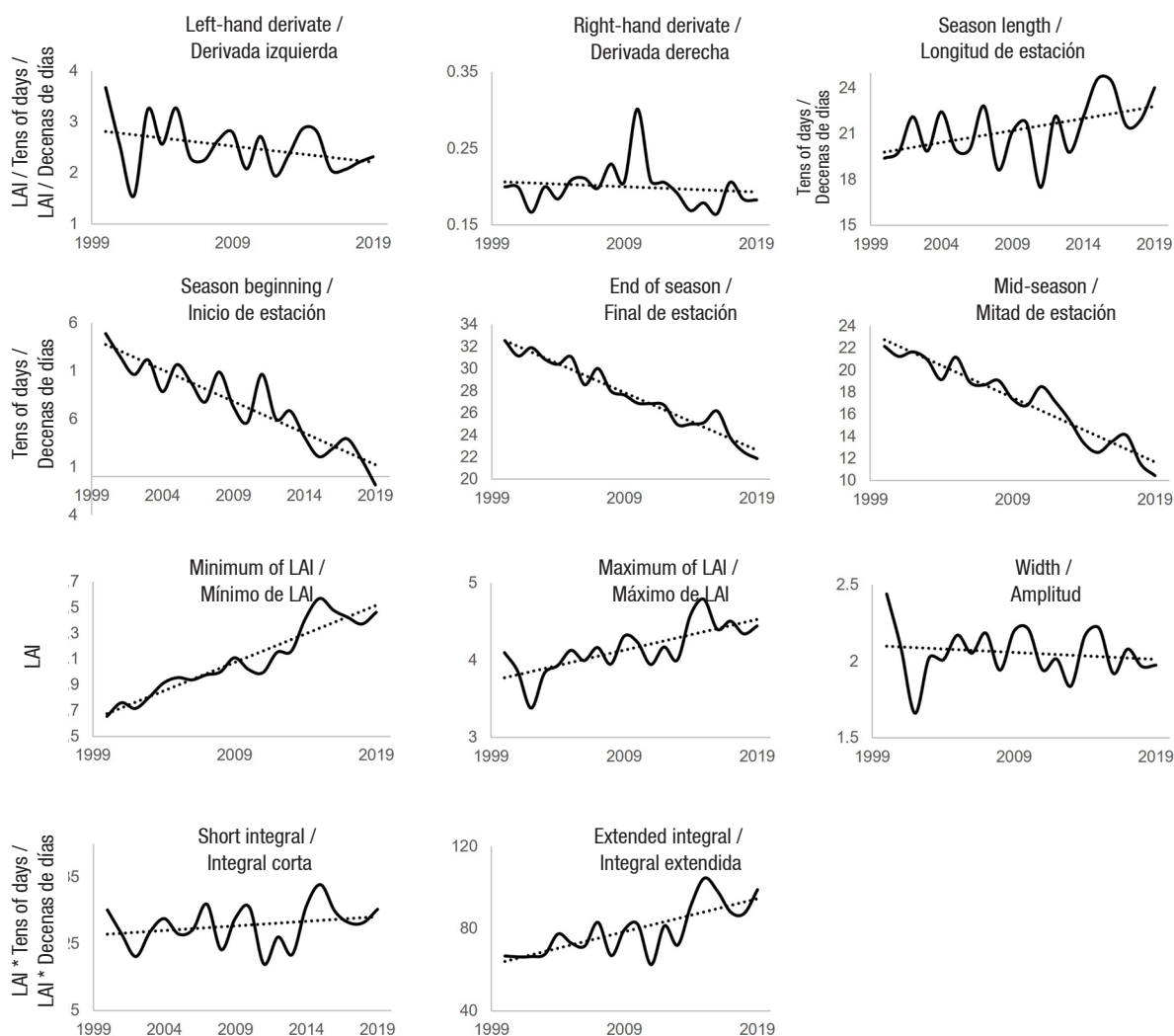


Figure 4. Annual average of each phenological variable in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve in the period 2000-2019. LAI: leaf area index.

Figura 4. Promedio anual de cada variable fenológica en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca en el periodo 2000-2019. LAI: índice de área foliar.

begin the period studied with a lower minimum LAI than forests, but end at the same level, which could correspond to an increase in their biomass due to the presence of leafier species and the emission of leaf buds in spring. The maximum LAI of the crops was lower than in the other land covers; however, it had a greater amplitude.

For natural land covers, the remaining vegetation (difference between extended and short integral) is the major element and has more weight in the total LAI throughout the year, but not in the case of crops, for which the annual growth is more relevant. Longer growing seasons with higher LAI result in more cumulative LAI (correlation between extended integral and season length with $R^2 = 0.77$, and with maximum LAI, $R^2 = 0.73$). The presence of evergreen plants or

El inicio, final y mitad de estación de crecimiento son cada vez más tempranos del orden de 10 decenas de días del inicio al final del periodo estudiado: el inicio de estación pasa del mes de mayo (decena 15) al inicio del año, mientras que el final de estación pasa del mes de noviembre (decena 33) al de agosto (decena 23) y la mitad de estación pasa de agosto (decena 23) a abril (decena 13). Si bien los cultivos siguen la tendencia de adelantarse, presentan mayor estabilidad interanual que las coberturas naturales, pues las fechas de siembra y cosecha son en gran medida independientes del clima y dependientes de la voluntad humana. El mínimo de LAI es muy bajo en los cultivos, lo que se explica por la prevalencia de cultivos anuales de temporal. Por su parte, los arbustos inician el periodo estudiado con un mínimo de LAI inferior al de los bosques, pero terminan al mismo nivel, lo que podría corresponder a



Figure 5. Average of each phenological variable per land cover of the Monarch Butterfly Biosphere Reserve in the period 2000-2019. LAI: leaf area index.

Figura 5. Promedio de cada variable fenológica por cobertura de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca en el periodo 2000-2019. LAI: índice de área foliar.

species that can take advantage of the occasionally warm autumn temperatures to continue their vegetative development may also contribute to higher cumulative LAI (Buitenwerf et al., 2018).

Climate-phenology relationship

The beginning of the vegetative season was very slow (very small left derivative) and early (small season beginning) in 2002 for all land covers, as well as in 2010 and 2012 for shrubs and oyamel; this may be associated with a very rainy spring (May) in 2002 and heavy winter rains in 2010 and 2012. It can be interpreted that, when temperatures rose, the presence of moisture in spring resulted in an early and slow regrowth of vegetation,

un aumento en su biomasa por la presencia de especies más frondosas y por la emisión de yemas foliares en primavera. El máximo de LAI de los cultivos fue más bajo que en las otras coberturas; sin embargo, presentó mayor amplitud.

En las coberturas naturales, la vegetación remanente (diferencia entre integral extendida y corta) es el elemento mayoritario y tiene más peso en el total del LAI a lo largo del año, no así en el caso de los cultivos, para los que tiene más peso el crecimiento anual. Las estaciones de crecimiento más largas y con mayor LAI resultan en más LAI acumulado (correlación entre la integral extendida y la longitud de estación con $R^2 = 0.77$, y con el máximo de LAI, $R^2 = 0.73$). La presencia

maybe due to the differentiated reaction of the species. The growing season was long in those years and the maximum LAI was very low in 2002 for crops and shrubs.

In 2003, 2005, 2011 and 2013, the beginning of the growing season was very fast (very large left derivative), but late (large season on beginning), for shrubs and crops. Spring was dry in 2003 and 2005, as rains were delayed until June and July, respectively; 2003 was cold in February and March, 2005 in March, and in 2011 and 2013 May was very warm and dry, which delayed the relatively short growing season. However, the season was long for oyamel in 2005 with a late end of season, perhaps because despite being a dry year, the highest and coolest parts of the MBBR remained moist as reported by España-Boquera et al. (2019), which is consistent with the relatively higher value of the minimum LAI of this land cover. In 2011 and 2013, the minimum and maximum LAI were relatively low for the entire reserve, as well as the cumulative LAI of annual growth, considering the remaining vegetation, which may also be associated with the short rainy season and hot summer.

In 2007, rainfall was abundant in September and, although temperatures in this month were somewhat low, the growing season was long, the LAI was relatively large (particularly for oyamel), and annual and cumulative growth was significant. A similar behavior was observed in 2009, when rainfall was low in July and August, but increased in September. In 2008, the winter was dry and, although it rained in early spring, May was dry, so the start of the vegetative growing season was late and fast; the summer was cool and the end of the rains came early, which made the season short, and the maximum LAI and its amplitude, as well as annual and cumulative growth were relatively small.

In 2010, abundant winter rains were accompanied by low temperatures, but the remaining moisture was able to bring forward the beginning of the growing season. The summer was particularly wet and cold, and the rains ended prematurely leading to a very dry autumn, bringing the growing season to an abrupt end for crops, shrubs, and pines. That year's total and cumulative LAI were relatively large for shrubs and oyamel, respectively.

In 2014, the winter was warm and the summer started very rainy so the beginning of the season was fast and early; the minimum and maximum LAI were relatively large, as well as the amplitude (particularly in shrubs) and integrals. In 2015, the beginning of the growing season was very fast (except for oyamel) and early; this can be understood by the heavy rain in March after a warm winter. Winter rains caused a high LAI minimum, as vegetation of the lower strata was

de plantas de hoja perenne o de especies que pueden aprovechar las temperaturas ocasionalmente cálidas de otoño, para continuar su desarrollo vegetativo, también puede contribuir a que el LAI acumulado sea mayor (Buitenwerf et al., 2018).

Relación clima-fenología

El inicio de la temporada vegetativa fue muy lento (derivada izquierda muy pequeña) y temprano (inicio de estación pequeño) en 2002 en todas las coberturas, así como en 2010 y 2012 en arbustos y oyamel, lo que puede asociarse a una primavera muy lluviosa (mayo) en 2002 y a fuertes lluvias en invierno en 2010 y 2012. Se puede interpretar que, cuando las temperaturas se elevaron, la presencia de humedad en primavera dio lugar a un rebrote temprano y lento de la vegetación, quizá por la reacción diferenciada de las especies presentes. La estación de crecimiento fue larga en dichos años y el máximo de LAI fue muy bajo en 2002 para los cultivos y arbustos.

En 2003, 2005, 2011 y 2013, el inicio de la temporada vegetativa fue muy rápido (derivada izquierda muy grande), pero tardío (inicio de estación grande), para arbustos y cultivos. La primavera fue seca en 2003 y 2005, ya que las lluvias se atrasaron hasta junio y julio, respectivamente; 2003 fue frío en febrero y marzo, 2005 en marzo, y en 2011 y 2013 mayo fue muy cálido y seco, lo que retrasó la estación de crecimiento que fue relativamente corta. No obstante, la estación fue larga en el oyamel en 2005 con un final de estación tardío, quizá porque a pesar de ser un año seco, las partes más altas y frescas de la RBMM se mantuvieron húmedas como reportan España-Boquera et al. (2019), lo cual es coherente con el valor relativamente más alto del LAI mínimo de esta cobertura. En 2011 y 2013, el mínimo y el máximo de LAI fueron relativamente bajos para toda la reserva, así como el LAI acumulado del crecimiento anual, considerando la vegetación remanente, lo que también se puede asociar a la estación corta de lluvias y el verano caluroso.

En 2007, las lluvias fueron abundantes en septiembre y, aunque las temperaturas en este mes fueron un poco bajas, la estación de crecimiento fue larga, el LAI fue relativamente amplio (en particular para el oyamel), y el crecimiento anual y acumulado fue importante. Un comportamiento similar se observó en 2009, año en el que las lluvias fueron escasas en julio y agosto, pero aumentaron en septiembre. En 2008, el invierno fue seco y, si bien llovió al inicio de primavera, mayo fue seco, por lo que el inicio de la estación de crecimiento vegetativo se atrasó y fue rápido; el verano fue fresco y el final de las lluvias llegó temprano, lo que hizo que la estación fuera corta, y el máximo de LAI y su amplitud, así como el crecimiento anual y acumulado fueran relativamente pequeños.

maintained all year; also the maximum LAI was high in 2015, especially for shrubs and oyamel, as well as the cumulative LAI of annual growth, considering the remaining vegetation. In 2016, the end of season was late for crops and pines compared to previous years and the season was very long, which can be explained by cool temperatures in spring; the minimum LAI was high for oyamel and shrubs. In 2017, greening was late and slow for pine and crops; it rained in winter and summer rains were late, but abundant, while autumn was dry, causing the end of season to come quickly.

In 2018, the winter was warm and the summer started with abundant rainfall that lasted into the fall; the beginning of the season was early and slow, the season was long for crops and oyamel, the minimum and maximum LAI were high, although a little lower than in the immediate previous years, as well as the amplitude and integrals. In 2019, the season onset was much earlier, particularly for shrubs and oyamel, which may be due to the very warm winter and spring temperature that, although it was accompanied by a delay in rainfall, it is possible that in the elevated areas there was sufficient moisture. These circumstances are consistent with a later and quicker beginning of the season for crops. The growing season was very long for pines and shrubs.

To some extent, it is possible to interpret the behavior of some phenological variables from climate behavior; however, the effect of increased atmospheric CO₂ on particular phenophases (García-Mozo et al., 2006) and other factors associated with climate change must also be considered. On a global scale, the increase in LAI in the northern hemisphere appears to be driven mainly by the increase in atmospheric CO₂ concentration (accounting for 49 %), while interannual variations in LAI are controlled by temperature change (Piao, Friedlingstein, Ciais, Zhou, & Chen, 2006).

Other aspects related to plant phenology that are necessary for the growing season to begin must be included, such as the necessary cumulative heat (degree-days) and the winter cooling or the photoperiod; in addition, physiological sensitivity to climate is changeable during plant development, such as resistance to water stress (Bruce, Tyler, Shelly, & Mata, 2009; Seyednasrollah, Swensonb, Domec, & Clark, 2018).

Greening

Figure 6 shows the map of the annual (A) and total (B) increase of the leaf area index of each pixel in relation to the average of the corresponding land cover in the studied period. Pixels with higher than expected leaf area increase between 2000 and 2019 are shown in green and pixels with lower than expected increase are

En 2010, las lluvias abundantes en invierno estuvieron acompañadas de temperaturas bajas, pero la humedad remanente pudo hacer que el inicio de la estación vegetativa se adelantara. El verano fue particularmente lluvioso y frío, y las lluvias terminaron prematuramente dando lugar a un otoño muy seco, con lo que la estación de crecimiento terminó de forma abrupta para cultivos, arbustos y pinos. El LAI total de ese año y el acumulado fueron relativamente grandes para los arbustos y el oyamel, respectivamente.

En 2014, el invierno fue cálido y el verano inició muy lluvioso con lo que el inicio de la estación fue rápido y temprano; el mínimo y el máximo de LAI fueron relativamente grandes, así como la amplitud (particularmente en los arbustos) y las integrales. En 2015, el inicio de la temporada vegetativa fue muy rápido (excepto para el oyamel) y temprano; esto puede entenderse por la fuerte lluvia en marzo después de un invierno cálido. Las lluvias de invierno provocaron un mínimo de LAI alto, pues se mantuvo la vegetación de los estratos bajos todo el año; también el máximo de LAI fue alto en 2015, en especial para arbustos y oyamel, así como el LAI acumulado del crecimiento anual, considerando la vegetación remanente. En 2016, el final de estación se atrasó para cultivos y pinos con respecto a los años anteriores y la estación fue muy larga, lo que puede explicarse por las temperaturas frescas en primavera; el mínimo de LAI fue alto para oyamel y arbustos. En 2017, el reverdecimiento fue tardío y lento para el pino y los cultivos; llovió en invierno y las lluvias en verano se atrasaron, pero fueron abundantes, mientras que el otoño fue seco, lo que provocó que el final de estación llegara rápidamente.

En 2018, el invierno fue cálido y el verano inició con abundantes lluvias que se prolongaron hasta el otoño; el inicio de estación fue temprano y lento, la estación fue larga para los cultivos y el oyamel, el mínimo y el máximo de LAI fueron altos, aunque un poco inferiores a los de los años inmediatos anteriores, así como la amplitud y las integrales. En 2019, el inicio de estación se adelantó mucho, en particular para arbustos y oyamel, lo que puede deberse a la temperatura muy cálida de invierno y primavera que, a pesar de que estuvo acompañada por un retraso de las lluvias, es posible que en las zonas elevadas hubiera suficiente humedad. Estas circunstancias son coherentes con un inicio de estación más tardío y rápido para los cultivos. La estación de crecimiento fue muy larga para pinos y arbustos.

Hasta cierto punto es posible interpretar el comportamiento de algunas variables fenológicas a partir del comportamiento del clima; sin embargo, también debe considerarse el efecto del incremento de CO₂ en la atmósfera sobre fenofases particulares (García-Mozo et al., 2006) y de otros factores asociados al cambio climático. A escala global, el aumento

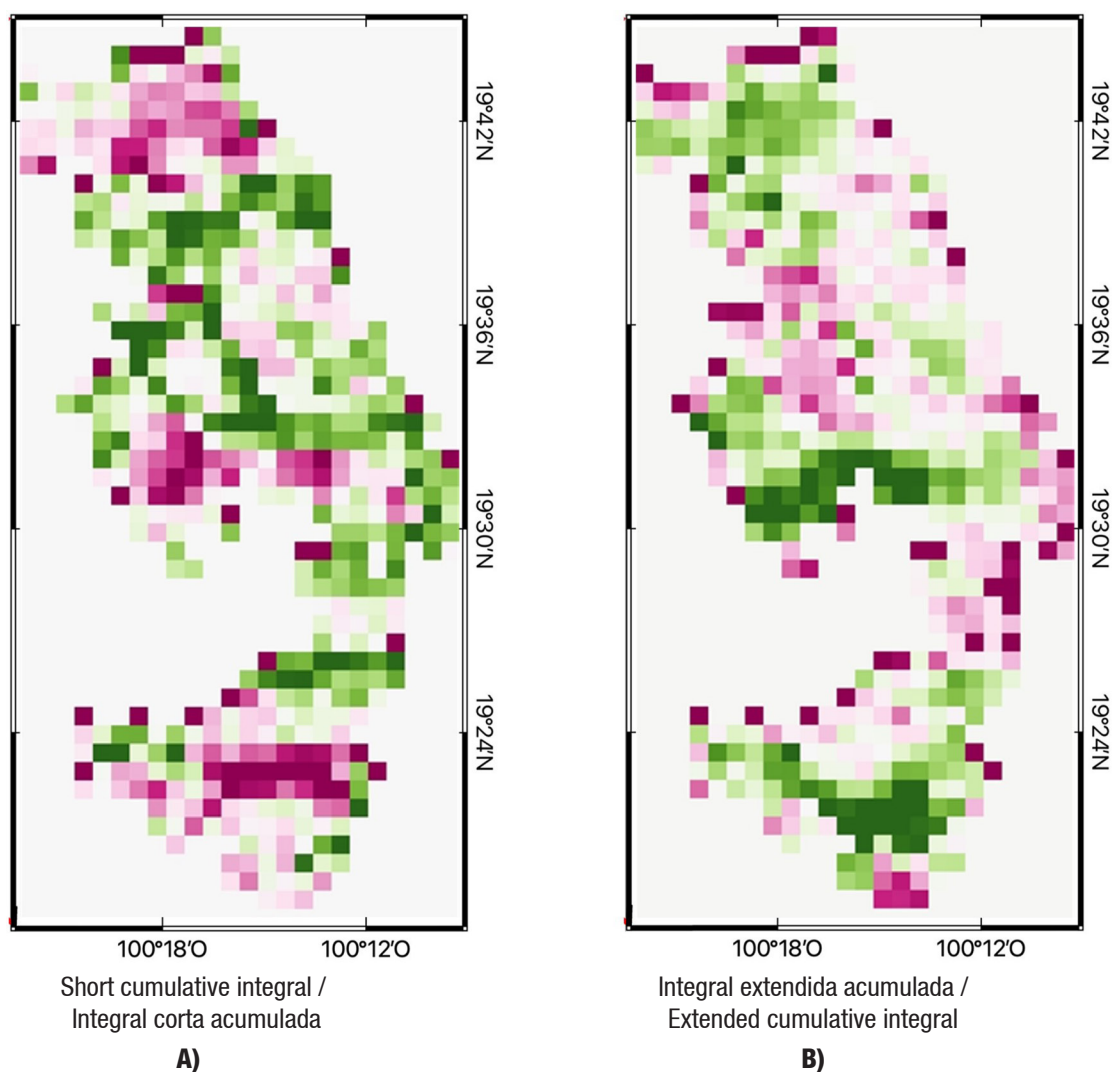


Figure 6. Map of the spatial distribution of the cumulative annual (A) and total (B) increase in leaf area index (LAI) of each pixel, relative to the average of the corresponding cover over the period 2000-2019. In green, pixels that consistently had leaf area increases greater than the average of their cover; in pink, pixels with increases less than the average of their cover; darker shades (green or pink) indicate larger absolute values of differences.

Figura 6. Mapa de la distribución espacial del incremento acumulado anual (A) y total (B) del índice de área foliar (LAI) de cada píxel, en relación con el promedio de la cobertura correspondiente en el periodo 2000-2019. En verde, los píxeles que de manera consistente tuvieron incremento del área foliar mayor que su promedio de cobertura; en rosa, los píxeles con incremento menor que su promedio de cobertura; tonos más oscuros (verdes o rosas) indican valores absolutos de diferencias mayores.

shown in pink; darker shades (green or pink) indicate larger differences (positive or negative) in relation to the interannual average.

In the MBBR, 12.82 % showed no significant changes compared to the average of previous years (cumulative increase or decrease of less than 100 LAI points, which means 5 m² of leaf area·m⁻² of soil·year⁻¹); 53.21 % recorded greening and 33.97 % showed some degree of browning. In Mexico, it is estimated that 28.4 % of the

de LAI en el hemisferio norte parece ser impulsado principalmente por el aumento de la concentración de CO₂ atmosférico (que representa 49 %), mientras que las variaciones interanuales en LAI están controladas por el cambio de temperatura (Piao, Friedlingstein, Ciais, Zhou, & Chen, 2006).

Por otra parte, hay que tomar en cuenta otros aspectos relacionados con la fenología de las plantas que son necesarios para que la estación de crecimiento pueda

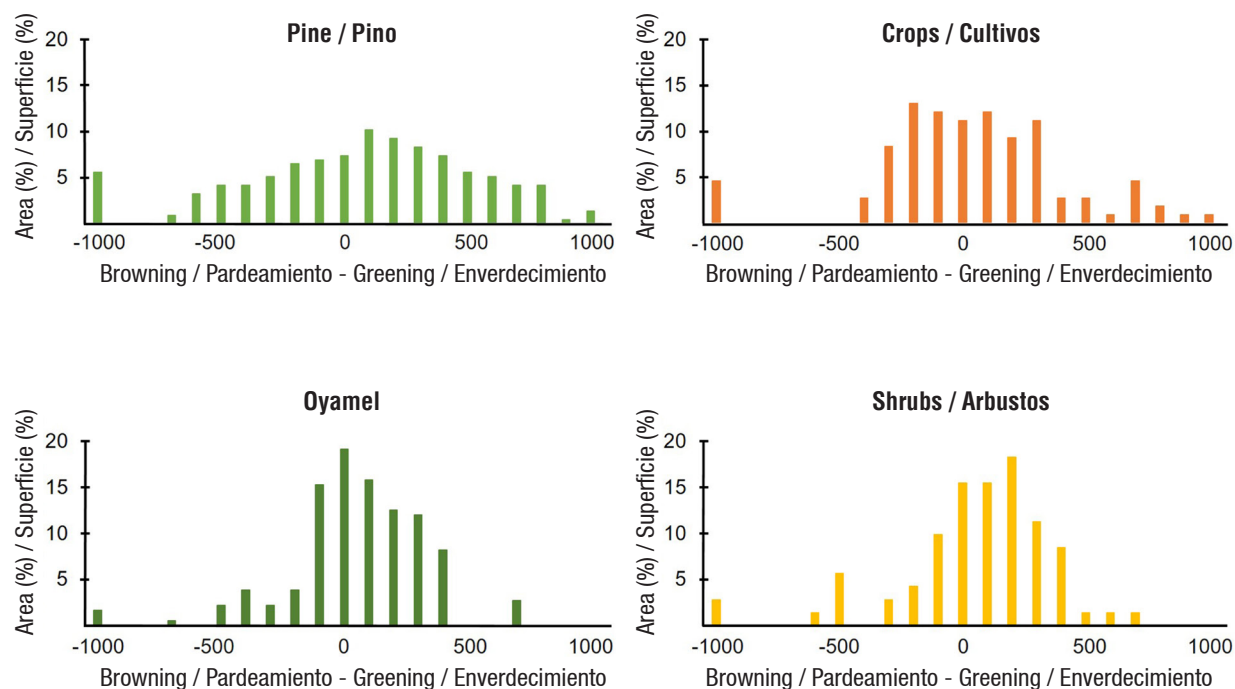


Figure 7. Distribution of greening and browning levels in each land cover. On the horizontal axis, leaf area index (LAI) levels in relation to the average of the corresponding land cover for the period 2000-2019. One LAI level corresponds to 0.5 m^2 of leaf area per m^2 of soil; a variation of 100 levels means $5 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{year}^{-1}$. The vertical axis shows the percentage of surface area (pixels).

Figura 7. Distribución de los niveles de enverdeamiento y pardeamiento en cada cobertura. En el eje horizontal, niveles de índice de área foliar (LAI) con respecto al promedio de la cobertura correspondiente en el periodo 2000-2019. Un nivel de LAI corresponde a 0.5 m^2 de superficie foliar por cada m^2 de suelo; una variación de 100 niveles supone $5 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{año}^{-1}$. En el eje vertical se indica el porcentaje de superficie (píxeles).

plant area shows greening, while 2.4 % shows browning (Chen et al., 2019). In Europe, LAI increased in 84 % of pixels with semi-original vegetation, the absolute increase in LAI being higher in vegetation types with abundant biomass (forests), while, in relative terms, the increase was higher for woody vegetation types with intermediate biomass (Buitenwerf et al., 2018).

Figure 7 shows the percentage of area with greening and browning in each land cover. For pine forest, 7 % of the area showed no significant changes, 37 % recorded browning (in 18 % it is lower than 300 LAI points, which corresponds to $15 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{year}^{-1}$), while 66 % shows greening (in 27 % it is lower than 300 LAI points). The greatest greening occurs in two pine areas; one in the center, which CONAFOR-UACH reported as infested by mistletoe and bark beetle and where SEMARNAT carried out a sanitation in 2009 (Champo-Jiménez, Valderrama-Landeros, & España-Boquera, 2012), and another to the south, in Cerro Pelón. These are south-facing areas where, on average, the growing season is very long, the minimum and maximum LAI are very high, the short integral is low, and the extended one is very high (España-Boquera et al., 2019). However, in this zone, the cumulative annual growth in the period

iniciar, como el calor acumulado necesario (grados-día) y el enfriamiento invernal o el fotoperiodo; además, la sensibilidad fisiológica al clima es cambiante durante el desarrollo de la planta, tal como la resistencia al estrés hídrico (Bruce, Tyler, Shelly, & Mata, 2009; Seyednasrollah, Swensonb, Domec, & Clark, 2018).

Enverdeamiento

La Figura 6 muestra el mapa del incremento anual (A) y total (B) del índice de área foliar de cada píxel en relación con el promedio de la cobertura correspondiente en el periodo estudiado. En verde se señalan los píxeles que entre 2000 y 2019 han tenido incremento de área foliar mayor que el esperado y en rosa se muestran los píxeles con incremento menor que el esperado; los tonos más oscuros (verdes o rosas) indican diferencias más grandes (positivas o negativas) con relación al promedio interanual.

En la RBMM, 12.82 % no presentó cambios significativos con respecto al promedio de años anteriores (incremento o decremento acumulado menor de 100 puntos de LAI, que suponen 5 m^2 de superficie foliar $\cdot \text{m}^2$ de suelo $\cdot \text{año}^{-1}$); 53.21 % registra enverdeamiento y

is lower than the average for pine, so the presence of important remnant vegetation is evident; for example, deciduous oak species (an important component in mixed pine-oak forests) have been reported for the reserve (Romero-Rangel et al., 2014) that lose their foliage in the non-rainy season. In Europe, the strongest increases in LAI have been observed in moderate climates in partially forested vegetation types and consist of more vigorous woody growth after the cessation of intensive management; greening in forests may also be due to the growth of increasingly taller trees that support a denser canopy and thus increase LAI (Buitenwerf et al., 2018).

From the area under cultivation, 11% shows no significant change in cumulative LAI, 41% shows browning (23% below 300 LAI points) and 48% greening (32% below 300); i.e., there is almost as much crop area with browning, generally moderate, as with greening that becomes significant in some areas. Globally, it is estimated that agriculture contributes one third to the increase in the amount of vegetation, which would be a secondary effect of agricultural practices (Chen et al., 2019; Gao et al., 2019). Greening could be the result of changes in average leaf size, number of leaves per plant, plant density, species composition, duration of green leaf presence due to changes in the growing season or introduction of multiple crops (Chen et al., 2019).

On the other hand, for shrubs, 15 % of the area was unchanged, 27 % showed browning (17 % below 300 LAI points) and 58 % greening (44 % below 300); that is, half of the area had moderate greening, with some areas of browning.

Oyamel is the cover with the highest percentage of unchanged surface (19 %); more than half (51 %) shows moderate greening (41 % less than 300 LAI points), while 30 % shows browning (21 % less than 300). A zone is observed in the extreme north, where greening is important; this is the best preserved area of the MBBR (Champo-Jiménez et al., 2012) of northwest orientation, where the beginning, middle and end of season are early and slow, the growing season is long, the minimum LAI is high and the maximum is moderate, the amplitude and short integral are small and the extended integral is large (España-Boquera et al., 2019). In this zone, the cumulative annual growth over the period is lower than the average for oyamel (negative value of the cumulative short integral), possibly due to the presence of associated vegetation.

The highest zone of the MBBR (climate is cooler and wetter year-round), where oyamel and shrubs predominate, showed stable values (close to the interannual average) of both cumulative extended

33.97 % muestra algún grado de pardeamiento. En México se calcula que 28.4 % de la superficie vegetal presenta enverdecimiento, mientras que 2.4 % muestra pardeamiento (Chen et al., 2019). En Europa, el LAI aumentó en 84 % de los píxeles con vegetación semioriginal, siendo mayor el incremento absoluto de LAI en los tipos de vegetación con biomasa abundante (bosques), mientras que, en términos relativos, el incremento fue mayor en los tipos de vegetación leñosa con biomasa intermedia (Buitenwerf et al., 2018).

En la Figura 7 se observa el porcentaje de superficie con enverdecimiento y pardeamiento en cada cobertura. En el bosque de pino, 7 % de la superficie no presentó cambios importantes, 37 % registró pardeamiento (en 18 % es inferior a 300 puntos de LAI, que corresponden a $15 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$), mientras que 66 % presenta enverdecimiento (en el 27 % es inferior a 300 puntos de LAI). El mayor enverdecimiento se da en dos zonas de pino; una al centro, que CONAFOR-UACH reportaron como infestada por muérdago y descortezador y donde la SEMARNAT realizó un saneamiento en 2009 (Champo-Jiménez, Valderrama-Landeros, & España-Boquera, 2012), y otra al sur, en el cerro Pelón. Se trata de áreas de orientación sur donde, en promedio, la estación de crecimiento es muy larga, el mínimo y el máximo de LAI son muy altos, la integral corta es baja y la extendida es muy alta (España-Boquera et al., 2019). No obstante, en esta zona, el crecimiento anual acumulado en el periodo es inferior a la media del pino, por lo que se infiere presencia importante de vegetación remanente; por ejemplo, para la reserva han sido reportadas especies caducifolias de encino (componente importante en el bosque mixto de pino-encino) (Romero-Rangel et al., 2014) que pierden su follaje en la época sin lluvias. En Europa, los incrementos más fuertes de LAI se han observado en los climas moderados en tipos de vegetación parcialmente arbolada y consisten en un crecimiento leñoso más vigoroso después del cese del manejo intensivo; el enverdecimiento en bosques también puede deberse al crecimiento de los árboles que, cada vez más altos, soportan un dosel más denso y, por lo tanto, aumentan el LAI (Buitenwerf et al., 2018).

De la superficie cultivada, 11 % no presenta cambios importantes en el LAI acumulado, 41 % registra pardeamiento (23 % inferior a 300 puntos de LAI) y 48 % enverdecimiento (32 % menor de 300); es decir, hay casi tanta superficie de cultivo con pardeamiento, en general moderado, como con enverdecimiento que llega a ser importante en algunas zonas. A nivel global se calcula que la agricultura contribuye con un tercio al aumento de la vegetación, lo que sería un efecto secundario de las prácticas agrícolas (Chen et al., 2019; Gao et al., 2019). El enverdecimiento podría ser el resultado de cambios en el tamaño promedio de las

and short integrals. This agrees with Buitenwerf et al. (2018), who report that the smallest LAI increases occur in cooler areas across all vegetation types, whereas, in many vegetation types, LAI increases are higher in zones with average temperatures and intermediate soil moisture than in warmer areas, whether dry or very wet. Soil moisture is partially regulated by evapotranspiration, which in turn is partially regulated by temperature, a variable that not only affects plant functioning through water relations, but also physiological (photosynthesis and phenology) and behavioral (leaf expansion) processes (Buitenwerf et al., 2018; Montgomery et al., 2020).

Conclusions

Mean temperature increased 0.87 °C in the period 2000-2019, while precipitation remained relatively stable. The beginning, middle, and end of growing season have occurred earlier, particularly in years with rainy winters or springs; minimum and maximum leaf area index have increased, as well as total cumulative leaf area, which is associated with rainy years in late summer, resulting in longer growing seasons. Dry and warm springs delay the onset of the season, except in oyamel, due to the higher humidity of the elevated areas where it is found. Greening was recorded in 53.21 % of the land cover and 33.97 % showed some degree of browning; in oyamel, 19 % remained unchanged, 30 % with browning and 51 % with greening. The study of biophysical climate feedbacks will help to develop more integrated and effective climate mitigation and adaptation strategies.

Acknowledgments

This study was funded by the Coordination of Scientific Research of the Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

End of English version

References / Referencias

- Arias-Maldonado, M. (2018). *Antropoceno. La política en la era humana*. España: Taurus Penguin Random House.
- Baret, F., Weiss, M., Lacaze, R., Camacho, F., Makhmara, H., Pacholczyk, P., ...Smets, B. (2013). GEOV1: LAI and FAPAR essential climate variables and FCOVER global time series capitalizing over existing products. Part1: Principles of development and production. *Remote Sensing of Environment*, 137, 299–309. doi: 10.1016/j.rse.2012.12.027
- Bruce, E. M., Tyler, C. M., Shelly, C., & Mata, C. (2009). A comparative study of oak (*Quercus*, Fagaceae) seedling physiology during summer drought in southern California. *American Journal of Botany*, 96(4),

hojas, el número de hojas por planta, la densidad de las plantas, la composición de las especies, la duración de la presencia de las hojas verdes por cambios en la estación de crecimiento o por la introducción de cosechas múltiples (Chen et al., 2019).

Por otra parte, en los arbustos, 15 % de la superficie no presentó cambios, 27 % pardeamiento (17 % inferior de 300 puntos de LAI) y 58 % enverdecimiento (44 % menor de 300); es decir, la mitad de la superficie tuvo enverdecimiento moderado, observándose también algunas zonas de pardeamiento.

La cobertura de oyamel es la de mayor superficie sin cambios (19 %); más de la mitad (51 %) presentó enverdecimiento moderado (41 % menor de 300 puntos de LAI), mientras que 30 % presenta pardeamiento (21 % menor de 300). Se observa una zona en el extremo norte, donde el enverdecimiento es importante; se trata del área mejor conservada de la RBMM (Champo-Jiménez et al., 2012) de orientación noroeste, donde el inicio, mitad y final de estación son tempranos y lentos, la estación de crecimiento es larga, el mínimo de LAI es alto y el máximo es moderado, la amplitud y la integral corta son pequeñas y la integral extendida es grande (España-Boquera et al., 2019). En esta zona, el crecimiento anual acumulado en el periodo es inferior a la media del oyamel (valor negativo de la integral corta acumulada), posiblemente por la presencia de vegetación asociada.

La zona más elevada de la RBMM (clima es más frío y húmedo todo el año), en la que predominan el oyamel y los arbustos, presentó valores estables (cercanos al promedio interanual) tanto de integral extendida como corta acumuladas. Esto concuerda con Buitenwerf et al. (2018), quienes reportan que los incrementos más pequeños de LAI ocurren en las zonas más frías en todos los tipos de vegetación, mientras que, en muchos tipos de vegetación, los incrementos de LAI son mayores en las áreas con temperaturas medias y humedad de suelo intermedia que en áreas más cálidas, ya sean secas o muy húmedas. La humedad del suelo está regulada parcialmente por la evapotranspiración, la que a su vez está regulada parcialmente por la temperatura, variable que no solo afecta el funcionamiento de las plantas a través de las relaciones con el agua, sino que también a los procesos fisiológicos (fotosíntesis y fenología) y conductuales (expansión de las hojas) (Buitenwerf et al., 2018; Montgomery et al., 2020).

Conclusiones

La temperatura media aumentó 0.87 °C en el periodo 2000-2019, mientras que la precipitación se mantuvo relativamente estable. El inicio, mitad y final de estación de crecimiento han ocurrido más temprano, en particular en los años con inviernos o primaveras

- 751–761. doi: 10.3732/ajb.0800247
- Buitenwerf, R., Sandel, B., Normand, S., Mimet, A., & Svenning, J. C. (2018). Land surface greening suggests vigorous woody regrowth throughout European seminatural vegetation. *Global Change Biology*, 24(12), 5789–5801. doi: 10.1111/gcb.14451
- Champo-Jiménez, O., Valderrama-Landeros, L., & España-Boquera, M. L. (2012). Pérdida de cobertura forestal en la reserva de la biosfera Mariposa Monarca, Michoacán, México (2006-2010). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(2). doi: 10.5154/r.rchscfa.2010.09.074
- Chen, C., Park, T., Wang, X., Piao, S., Xu, B., Chaturvedi, ... Myneni, R. B. (2019). China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability*, 2, 122–129. doi: 10.1038/s41893-019-0220-7
- Cui, L., Wang, L., Singh, R. P., Lai, Z., Jiang, L., & Yao, R. (2018). Association analysis between spatiotemporal variation of vegetation greenness and precipitation/temperature in the Yangtze River Basin (China). *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 21867–21878. doi: 10.1007/s11356-018-2340-4
- España-Boquera, M. L., Champo-Jiménez, O., & Uribe-Salas, M. D. (2019). Fenología de la Reserva Biósfera Mariposa Monarca con series de índice de área foliar. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 6(18), 435–449. doi: 10.19136/era.a6n18.1941
- Forzieri, G., Alkama, R., Miralles, D. G., & Cescatti, A. (2017). Satellites reveal contrasting responses of regional climate to the widespread greening of Earth. *Science*, 356, 1180–1184. doi: 10.1126/science.aal1727
- Forzieri, G., Alkama, R., Miralles, D. G., & Cescatti, A. (2018). Response to comment on “Satellites reveal contrasting responses of regional climate to the widespread greening of Earth”. *Science*, 360, 6394. doi: 10.1126/science.aap9664
- Gao, X., Liang, S., & He, B. (2019). Detected global agricultural greening from satellite data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 276–277, 107652. doi: 10.1016/j.agrformet.2019.107652
- García-Mozo, H., Galán, C., Jato, V., Belmonte, J., Díaz de la Guardia, C., Fernández, D., ... Domínguez-Vilches, E. (2006). *Quercus* pollen season dynamics in the Iberian Peninsula: response to meteorological parameters and possible consequences of climate change. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 13, 209–224. <http://www.aaem.pl/pdf-90566-25112?filename=QUERCUS%20POLLEN%20SEASON.pdf>
- Giménez de Azcárate, J., Ramírez, M. I., & Pinto, M. (2003). Las comunidades vegetales de la Sierra de Anganguo (estados de Michoacán y México, México): Clasificación, composición y distribución. *Lazaroa*, 24, 87–111. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1028620>
- IPCC AR5 (2013). *Climate Change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment* Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- Jönsson, P., & Eklundh, L. (2004). TIMESAT: A program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers & Geosciences*, 30(8), 833–845. doi: 10.1016/j.cageo.2004.05.006
- Leverkus, A. B., Jaramillo-López, P. F., Brower, L. P., Lindenmayer, D. B., & Williams, E. H. (2017). Mexico's logging threatens butterflies. *Science*, 358, 1008. doi: 10.1126/science.aar3826
- Montgomery, R. A., Rice, K. E., Stefanski, A., Rich, R. L., & Reich, P. B. (2020). Las respuestas fenológicas de los árboles templados y boreales al calentamiento dependen de las temperaturas ambientales de primavera, el hábito de las hojas y el rango geográfico. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(19), 10397-10405. doi: 10.1073/pnas.1917508117
- Piao, S., Friedlingstein, P., Ciais, P., Zhou, L., & Chen, A. (2006). Effect of climate and CO₂ changes on the greening of the Northern Hemisphere over the past two decades. *Geophysical Research Letters*, 33(23), L23402. doi: 10.1029/2006GL028205
- Romero-Rangel, S., Rojas-Zenteno, E. C., & Rubio, L. L. (2014). Familia Fagaceae. In J. Rzedowski & G. Calderón de Rzedowski (Eds.), *Flora del Bajío y de regiones adyacentes* (1–167). Pátzcuaro, México: Instituto de Ecología, A. C. doi: 10.21829/fb.64.2014.181

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Fin de la versión en español

- Syednasrollah, B., Swenson, J. J., Domec, J. C., & Clark, J. S. (2018). Leaf phenology paradox: Why warming matters most where it is already warm. *Remote Sensing of Environment*, 209, 446–455. doi: 10.1016/j.rse.2018.02.059
- Vrieling, A., Meroni, M., Darvishzadeh, R., Skidmore, A. K., Wang, T., Zurita-Milla, R., ... Paganini, M. (2018). Vegetation phenology from Sentinel-2 and field cameras for a Dutch barrier island. *Remote Sensing of Environment*, 215, 517–529. doi: 10.1016/j.rse.2018.03.014
- Zeng, Z., Piao, S., Li, L., Zhou, L., Ciais, P., Wang, T., ... Wang, Y. (2017). Climate mitigation from vegetation biophysical feedbacks during the past three decades. *Nature Climate Change*, 7, 432–436. doi: 10.1038/nclimate3299
- Zeng, Z., Peng, L., & Piao, S. (2018). Response of terrestrial evapotranspiration to Earth's greening. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 33, 9–25. doi: 10.1016/j.cosust.2018.03.001

