

CAPACIDAD DE LOS DATOS FENOLÓGICOS DERIVADOS DE CYCLOPES-LAI DEL AÑO 2000 PARA DISTINGUIR LOS TIPOS DE COBERTURA EN EL ESTADO DE MICHOACÁN, MÉXICO

CAPACITY OF PHENOLOGICAL DATA DERIVED FROM CYCLOPES LAI FOR THE YEAR 2000 TO DISTINGUISH LAND COVER TYPES IN THE STATE OF MICHOACÁN, MEXICO

Luis Valderrama-Landeros¹; Ma. Luisa España-Boquera¹; Frédéric Baret²;
Nahum Sánchez-Vargas¹; Cuauhtémoc Sáenz-Romero¹.

¹Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales.

Posta Veterinaria, km 9.5 Carretera Morelia-Zinapécuaro.

C. P. 58880. Michoacán, MÉXICO.

Correo-e: mespanaboquera@gmail.com Tel.: 52-443-2958323 (Autora para correspondencia)

²INRA-CSE, Agroparc, 84914, Avignon, FRANCE.

RESUMEN

Se exploró la capacidad de los datos fenológicos de la serie LAI del proyecto CYCLOPES del año 2000, para distinguir tipos de vegetación generales (bosque de hoja perenne, de hoja caduca, cultivos y pastizal-matorral) en Michoacán, México. Con el programa TIMESAT se extrajeron 11 variables fenológicas de cada píxel de 1 km de dicha serie. El comportamiento de cada variable se analizó tomando como referencia el mapa INF2000. Las principales diferencias corresponden al carácter caducifolio o perennifolio de la vegetación. Las 11 variables se redujeron a cinco componentes principales (98 % de la varianza), para hacer una clasificación no supervisada de 250 clases o grupos fenológicos. Cada clase se asoció a uno de los tipos de cobertura, según el criterio de máxima coincidencia de área con el mapa de referencia INF2000, para construir el mapa de cobertura CYCL2000. La comparación de ambos mapas mostró exactitud total de 63 %. Los bosques de hoja caduca fueron los mejor identificados (80.1 % de píxeles identificados correctamente y 62.1 % bien clasificados), seguidos de los de hoja perenne (74.1 %, 69.9 %), cultivos (62.9 %, 61.1 %) y pastizal-matorral (16.9 %, 52.3 %). La identificación relativamente buena de los bosques permitirá utilizar este enfoque para estimar la deforestación.

PALABRAS CLAVE: Serie de tiempo, fenología, variables biofísicas, mapa de cobertura, datos globales.

ABSTRACT

The capacity of the phenological data of the CYCLOPES project LAI series for the year 2000 to distinguish general vegetation types (evergreen forest, deciduous forest, crops and pasture-shrubland) in Michoacán, Mexico, was explored. Using the TIMESAT program, 11 phenological variables of each 1-km pixel of that series were extracted. The behavior of each variable was analyzed using the INF2000 map as a reference. The main differences relate to the deciduous or evergreen character of the vegetation. The 11 variables were reduced to five principal components (98 % of the variance) to make an unsupervised classification of 250 phenological classes or groups. Each class was associated with one of the cover types, with a criterion of maximum area matched with the INF2000 reference map, in order to construct the CYCL2000 cover map. Comparing the two maps yielded modest results, with 63 % total accuracy. Deciduous forests were better identified (80.1 % of pixels correctly identified and 62.1 % correctly classified), followed by evergreen forests (74.1 %, 69.9 %), crops (62.9 %, 61.1 %) and pasture-shrubland (16.9 %, 52.3 %). The relatively good identification of forests shows that this approach could be used to estimate deforestation.

KEYWORDS: Time series, phenology, biophysical variables, cover map, global data.



Recibido: 18 de agosto, 2013

Aceptado: 26 de junio, 2014

doi: 10.5154/r.chscfa.2013.08.025

<http://www.chapingo.mx/revistas>

INTRODUCCIÓN

Las imágenes satelitales de la Tierra empezaron a adquirirse hace aproximadamente 30 años, por lo que constituyen un registro de la evolución de la superficie del planeta en tiempos recientes (Achard & Hansen, 2013; Gillespie, Foody, Rocchini, Giorgi, & Saatchi, 2008; Pfeifer, Disney, Quaife, & Marchant, 2011). A partir del acervo histórico de dichas imágenes se han construido series de tiempo para estudiar la evolución y la situación de las superficies naturales a nivel global, particularmente ante el preocupante escenario actual de cambio climático y de uso de suelo (DeFries, 2013; Houghton, 2013).

Las series de tiempo son bases de datos en las que cada punto del planeta (de 1 km² en la mayoría de las series existentes) tiene asociados datos correspondientes a fechas concatenadas, en pasos de tiempo fijos y cercanos (típicamente 1 o más datos al mes), con algunos huecos debido a la presencia de nubes (Kandasamy, Baret, Verger, Neveux, & Weiss, 2012; Petitjean, Inglada, & Gancarski, 2012). Los datos consisten en índices de vegetación (típicamente el NDVI: *Normalized Difference Vegetation Index*) o bien variables biofísicas, como el índice de área foliar (LAI: *leaf area index*, área de una cara de tejido fotosintético por unidad de superficie de suelo), la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida por las plantas (fAPAR, *fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation*) o la fracción de cobertura (fCover). Las variables biofísicas presentan algunas ventajas sobre los índices de vegetación, pues las primeras tienen un significado físico real (ilustrativo de la densidad y el funcionamiento de la vegetación) y una dependencia menor de la precisión radiométrica de los sensores satelitales (Weiss, Baret, Garrigues, Lacaze, & Bicheron, 2007). La importancia de las series de tiempo radica en que permiten abordar el estudio de las superficies naturales desde un enfoque fenológico (Fisher, Frank, & Leggett, 2010; Jones & Vaughan, 2010). La evolución de una masa vegetal a lo largo de un ciclo anual (fenología) se refleja en la forma en que sus características biofísicas varían (LAI, fAPAR, fCover) y, a su vez, depende del tipo de vegetación de que se trate. Sin embargo, no existe una relación directa y biunívoca, entre fenología y tipo de vegetación, por lo que la posibilidad de utilizar series de tiempo para construir mapas de cobertura no es evidente.

Entre las series de tiempo de variables biofísicas disponibles destaca CYCLOPES (*Carbon cycle and Change in Land Observational Products from an Ensemble of Satellites*), construida por el proyecto GEOLAND2 en el año 2003, en el marco de la iniciativa GMES (*Global Monitoring of the Environment and Security*), coordinada por la ESA (*European Space Agency*). Los datos CYCLOPES se generaron utilizando imágenes del sensor SPOT/VEGETATION y consisten en series de tiempo globales de LAI, fAPAR y fCover, con pasos de 10 días (periodo para el que se promedian los datos útiles) y resolución de 1 km, entre 1999 y 2007. Las estimaciones surgen de redes neuronales entrenadas con simula-

INTRODUCTION

Satellite images of the Earth began to be acquired about 30 years ago, thereby providing a record of the evolution of the planet's surface in recent times (Achard & Hansen, 2013; Gillespie, Foody, Rocchini, Giorgi, & Saatchi, 2008; Pfeifer, Disney, Quaife, & Marchant, 2011). From the historical archiving of these images, time series have been constructed to study the evolution and current status of natural surfaces globally, particularly in light of the current worrying scenario of climate change and land use (DeFries, 2013; Houghton, 2013).

Time series are databases in which every point on the planet (1 km² in most existing series) has associated data for concatenated dates, in close fixed time intervals (typically 1 or more data per month), with some gaps due to cloud cover (Kandasamy, Baret, Verger, Neveux, & Weiss, 2012; Petitjean, Inglada, & Gancarski, 2012). The data consist of vegetation indices (typically the NDVI: *Normalized Difference Vegetation Index*) or biophysical variables such as *leaf area index* (LAI: the one-sided area of photosynthetic tissue per unit ground surface area), *the fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation* (fAPAR), or the fraction of cover (fCover). The biophysical variables have some advantages over vegetation indices, since the former have a real physical meaning (illustrative of the density and functioning of the vegetation) and less reliance on the radiometric accuracy of satellite sensors (Weiss, Baret, Garrigues, Lacaze, & Bicheron, 2007). The importance of time series lies in the fact that they allow us to study natural surfaces from a phenological approach (Fisher, Frank, & Leggett, 2010; Jones & Vaughan, 2010). The evolution of a plant mass over an annual cycle (phenology) is reflected in the way its biophysical characteristics vary (LAI, fAPAR, fCover) and, in turn, depends on the vegetation type concerned. However, there is no direct two-way relationship between phenology and vegetation type, so the possibility of using time series for constructing cover maps is not evident.

One of the best-known biophysical variable time series available is CYCLOPES (*Carbon Cycle and Change in Land Observational Products from an Ensemble of Satellites*), built by the GEOLAND2 project in 2003, in the GMES (*Global Monitoring of the Environment and Security*) initiative framework, and coordinated by the ESA (*European Space Agency*). The CYCLOPES data were generated using SPOT/VEGETATION sensor images and consist of global LAI, fAPAR and fCover time series, with 10-day intervals (period for which the useful data are averaged) and 1-km resolution, between 1999 and 2007. The estimates arise from neural networks trained with radiative transfer model simulations, which simulate light interception by plant elements, considering their optical and structural properties (Baret et al., 2007). The expertise gained in the development of the CYCLOPES series has allowed the creation of the Biopar series (Geoland2, 2014).

ciones de modelos de transferencia radiactiva, que simulan la intercepción de la luz por los elementos vegetales, considerando sus propiedades ópticas y estructurales (Baret et al., 2007). La experiencia generada en el desarrollo de la serie CYCLOPES ha permitido la creación de las series Biopar (Geoland2, 2014).

El objetivo de este trabajo fue explorar la capacidad de los datos fenológicos (temporalidad de la presencia, ausencia y cantidad o densidad de follaje) contenidos en la serie de LAI del proyecto CYCLOPES, para distinguir los principales tipos de vegetación en el estado de Michoacán. El estudio se realizó para el año 2000, único de la serie CYCLOPES para el que se tiene un mapa de referencia confiable.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

Michoacán de Ocampo es un estado del centro occidente de México, en la costa del océano Pacífico. La entidad tiene una extensión de 59,824 km² y se localiza entre los 17° 54' 34"-20° 23' 37" N y 100° 03' 23"-103° 44' 09" W (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática [INEGI], 1985); su relieve le otorga una gran diversidad de condiciones ecológicas (Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca [SEMARNAP], 1997). El clima está marcado por dos estaciones: una seca de noviembre a mayo y otra lluviosa de junio a octubre (García, 1989). Sobre los 1,600 m, el clima es templado y se encuentran bosques de coníferas y mixtos, con áreas agrícolas y de matorral. Entre los 600 y los 1,600 m predomina el clima tropical con selva baja. Para el resto del territorio, el clima es seco estepario y predominan la selva baja caducifolia y los matorrales espinosos.

Mapa de referencia

El mapa INF2000, desarrollado para el Inventario Nacional Forestal 2000, se utilizó como referencia para este trabajo (Palacio-Prieto et al., 2000), por ser un mapa confiable cuya precisión fue evaluada a partir de diferentes ejercicios de validación (Couturier et al., 2010; Velázquez, Mas, Bocco, & Palacio-Prieto, 2010). Este mapa se construyó mediante la interpretación visual de imágenes Landsat TM 1999-2000, y datos de campo (Mas et al., 2002), siguiendo el modelo cartográfico y geométrico de INEGI (proyección cónica conforme de Lambert [CCL] adaptada a México, datum ITRF2000, escala 1:250,000). Para hacer compatible el mapa con la serie de tiempo de LAI, se pasó al sistema de proyección de los datos CYCLOPES (proyección Universal Transversa de Mercator (UTM), datum WGS84 y resolución espacial de 1/112 de grado, aproximadamente 1 km).

En el mapa INF2000 se contabilizan 36 tipos de vegetación en Michoacán, de los 46 totales en México (Miranda & Hernández, 1963; Rzendowsky, 1978). En el presente estudio se propone una versión simplificada de la leyenda original, con

The aim of this study was to explore the capacity of the phenological data (temporality of the presence, absence and amount or density of foliage) contained in the CYCLOPES project LAI series to distinguish the main vegetation types in the state of Michoacán. The study was conducted for the year 2000, the only CYCLOPES time series for which there is a reliable reference map.

MATERIALS AND METHODS

Description of the study area

Michoacán de Ocampo is a state on the Pacific coast of central Mexico. The state covers an area of 59.824 km² and is located between 17° 54' 34"-20° 23' 37" N and 100° 03' 23"-103° 44' 09" W (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática [INEGI], 1985); its relief gives it a wide range of ecological conditions (Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca [SEMARNAP], 1997). The climate is marked by two seasons: a dry season from November to May and a rainy season from June to October (García, 1989). Above 1,600 m, the climate is temperate and there are coniferous and mixed forests, along with agricultural areas and shrubland. Between 600 and 1,600 m, a tropical climate with tropical forest predominates. The rest of the state has a dry steppe climate and tropical deciduous forest and thorny shrubland predominate.

Reference map

The INF2000 map, developed for the 2000 National Forest Inventory, was used as a reference for this work (Palacio-Prieto et al., 2000), being a reliable map whose accuracy was evaluated using different validation exercises (Couturier et al., 2010; Velázquez, Mas, Bocco, & Palacio-Prieto, 2010). This map was constructed by visual interpretation of Landsat TM 1999-2000 images, and field data (Mas et al., 2002), following the INEGI geometric mapping model (conical projection conforming to Lambert [CCL] adapted to Mexico, datum ITRF2000, scale 1:250,000). To make the map compatible with the LAI time series, it went through the CYCLOPES data projection system (Universal Transverse Mercator (UTM) projection, datum WGS84 and spatial resolution of 1/112 of a degree, about 1 km).

Of the 46 vegetation types in Mexico, 36 were counted in Michoacán in the INF2000 map (Miranda & Hernández, 1963; Rzendowsky, 1978). The present study proposes a simplified version of the original legend, with four cover types: evergreen forests (EF, coniferous and mixed), deciduous forests (DF, tropical dry forest), crops (CR) and pasture-shrubland (PS). Table 1 presents the simplification of the cover types and Figure 1 shows the corresponding map.

CYCLOPES project LAI series

CYCLOPES LAI series data, generated from SPOT/VEGETATION (VGT) sensor images, with 10-day intervals and

CUADRO 1. Leyenda original del mapa de referencia INF2000 y esquema de simplificación (empleado en el presente estudio) de los tipos de cobertura en el estado de Michoacán, México.

TABLE 1. Original legend of the INF2000 reference map and the simplified scheme (used in this study) of the cover types in the state of Michoacán, Mexico.

Leyenda original (INF2000) / Original legend (INF2000)	Leyenda simplificada / Simplified legend
Bosque de encino con vegetación arbustiva secundaria / Oak forest with secondary shrub vegetation	
Bosque de encino / Oak forest	
Selva baja caducifolia y subcaducifolia con vegetación herbácea / Deciduous and semi-deciduous dry forest with herbaceous vegetation	
Selva baja caducifolia y subcaducifolia / Deciduous and semi-deciduous dry forest	
Bosque espinoso / Thorn forest	
Bosque mesófilo de montaña / Cloud forest	Bosques de hoja caduca (BHC) / Deciduous forests (BHC)
Bosque mesófilo de montaña con vegetación arbustiva / Cloud forest with shrub vegetation	
Selva mediana caducifolia y subcaducifolia / Deciduous and semi-deciduous medium dry forest	
Selva mediana caducifolia y subcaducifolia con vegetación arbustiva / Deciduous and semi-deciduous medium dry forest with shrub vegetation	
Manglar / Mangrove	
Plantaciones forestales / Forest plantations	
Bosque de pino / Pine forest	
Bosque de pino con vegetación arbustiva / Pine forest with shrub vegetation	
Bosque de abies (incluyendo cedral) / Fir forest (including cedar)	
Bosque de abies con vegetación secundaria arbustiva (incluyendo cedro) / Fir forest with secondary shrub vegetation (including cedar)	Bosques de hoja perenne (BHP) / Evergreen forests (EF)
Bosque de pino-encino / Pine-oak forest	
Bosque de pino-encino con vegetación secundaria arbustiva / Pine-oak forest with secondary shrub vegetation	
Agricultura de riego / Irrigated agriculture	
Agricultura de temporal / Rain-fed agriculture	
Agricultura de humedad / Wet farming	
Cultivos anuales perennes y semiperennes / Evergreen and semi-evergreen annual crops	Cultivos (CU) / Crops (CR)
Pastizal cultivado / Cultivated pasture	
Palmeras / Palm trees	
Suelo desnudo / Bare soil	
Sabanas / Savannas	
Pastizal inducido / Induced pasture	
Pastizal subtropical con vegetación arbustiva / Subtropical pasture with shrub vegetation	
Matorral subtropical / Subtropical shrubland	Pastizales y matorrales (PM) / Pastures and shrublands (PS)
Matorral crasicaule / Crasicaule shrubland	
Pastizal natural (incluye <i>Acacia</i> spp.) / Natural grassland (includes <i>Acacia</i> spp.)	
Mezquital / Mezquital	
Matorral crasicaule con vegetación secundaria / Crasicaule shrubland with secondary vegetation	
Vegetación halófila y gypsófila / Halophytic and gypsophytic vegetation	
Humedales / Wetlands	
Urbano / Urban	Urbano / Urban
Agua / Water	Agua / Water

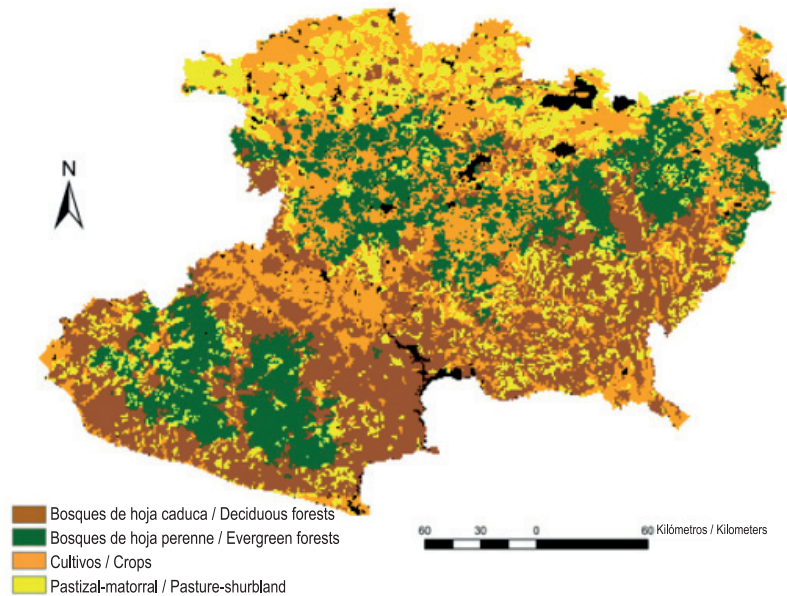


FIGURA 1. Mapa INF2000 del estado de Michoacán; versión simplificada con cuatro tipos de cobertura.
 FIGURE 1. INF2000 map of the state of Michoacán; simplified version with four cover types.

cuatro tipos de cobertura: bosques de hoja perenne (BHP, de coníferas y mixtos), bosques de hoja caduca (BHC, selva caducifolia), cultivos (CU) y pastizal-matorral (PM). El Cuadro 1 presenta la simplificación de los tipos de cobertura y en la Figura 1 se muestra el mapa correspondiente.

Serie de LAI del proyecto CYCLOPES

Se utilizaron los datos de LAI de la serie CYCLOPES, generados a partir de imágenes del sensor SPOT/VEGETATION (VGT), con pasos de 10 días y resolución de 1 km (1/112 grado). Los datos corresponden al año 2000 (48 datos de LAI por píxel, del 10 de enero del 2000 al 10 de mayo del 2001; un ciclo de crecimiento completo). La zona de estudio se recortó considerando el límite oficial del estado de Michoacán, según el INEGI (2012). No se consideraron cuerpos de agua ni zonas urbanas. Los datos faltantes a causa de la nubosidad fueron recuperados mediante interpolaciones lineales en el tiempo.

Análisis de los datos

El trabajo se dividió en tres partes: 1) extracción de las características fenológicas de cada tipo de vegetación a partir de los datos de LAI del proyecto CYCLOPES del estado de Michoacán, correspondientes al año 2000, 2) utilización de las características fenológicas y el mapa de referencia INF2000, para construir un nuevo mapa de cobertura del año 2000, CYC2000 y 3) comparación del mapa CYC2000 con el mapa de referencia INF2000, para evaluar el nivel de coincidencia.

1-km resolution (1/112 degree), were used. Data for the year 2000 were used (48 LAI data per pixel, from January 10, 2000 to May 10, 2001; a complete growth cycle). The study area was based on the official boundary of the state of Michoacán, according to INEGI (2012). Neither water bodies nor urban areas were considered. Missing data due to cloud cover were recovered by linear interpolation in time.

Data analysis

The work was divided into three parts: 1) extraction of the phenological characteristics of each vegetation type from the CYCLOPES project LAI data for the state of Michoacán, for the year 2000, 2) use of phenological characteristics and the INF2000 reference map to construct a new year-2000 cover map, CYC2000 and 3) comparison of the CYC2000 map with the INF2000 reference map to assess the matching level.

Phenological characterization of each vegetation type.

The CYCLOPES project LAI series data were analyzed pixel by pixel with the TIMESAT algorithm (Jönsson & Eklundh, 2004). As a result, 11 variables were obtained for each pixel (Figure 2; Table 2).

Table 3 shows the values taken for the TIMESAT-fitted parameters. The pixels with outliers in the variables start of season (month 11) and left and right derivatives (negative values) were removed. The distribution of the values of each phenological variable was obtained from the set of pixels labeled with each type of cover in the INF2000 reference map.

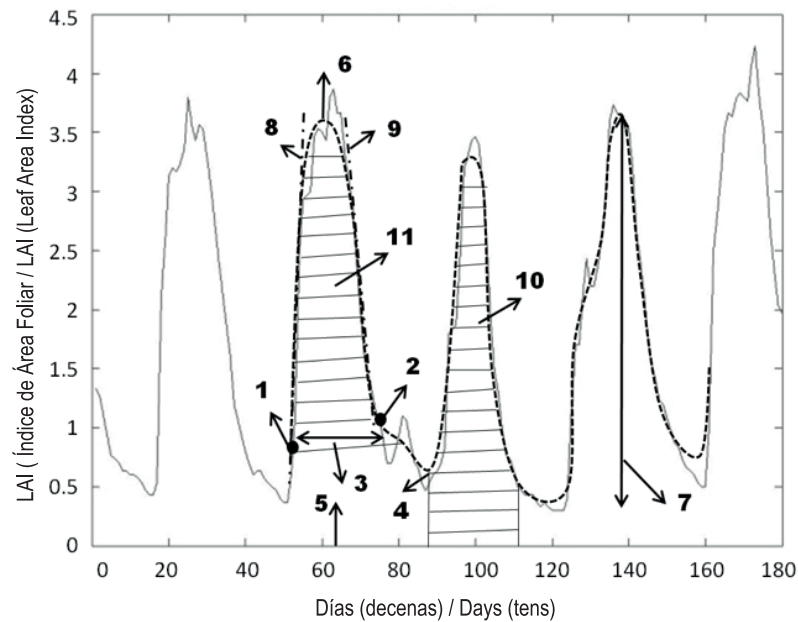


FIGURA 2. Variables obtenidas por TIMESAT: 1) Inicio de la estación, 2) Fin de la estación, 3) Longitud de la estación, 4) Mínimo de LAI, 5) Mitad de la estación, 6) Máximo de LAI, 7) Amplitud, 8) Derivada izquierda, 9) Derivada derecha, 10) Integral extendida, 11) Integral corta. Ejemplo con un píxel de bosque de hoja caduca de la zona de estudio (Michoacán, México). La línea continua representa la serie original; la línea discontinua, el ajuste del modelo.

FIGURE 2. Variables obtained by TIMESAT: 1) Start of the season, 2) End of the season, 3) Length of the season, 4) Minimum LAI, 5) Middle of the season, 6) Maximum LAI, 7) Amplitude, 8) Left derivative, 9) Right derivative, 10) Large integral, 11) Small integral. Example with a pixel of deciduous forest in the study area (Michoacán, Mexico). The solid line represents the original series, and the dotted line the fit of the model.

Caracterización fenológica de cada tipo de vegetación.

Los datos de la serie de LAI del proyecto CYCLOPES del año 2000 se analizaron píxel a píxel con el algoritmo TIMESAT (Jönsson & Eklundh, 2004). Como resultado se obtuvieron 11 variables para cada píxel (Figura 2; Cuadro 2).

En el Cuadro 3 se presentan los valores tomados para los parámetros de ajuste de TIMESAT. Los píxeles con valores extraños en las variables de inicio de estación (mes 11) y derivadas izquierda y derecha (valores negativos) se eliminaron. La distribución de los valores de cada variable fenológica se obtuvo del conjunto de píxeles etiquetados con cada tipo de cobertura en el mapa de referencia INF2000.

Construcción del mapa CYCL2000. Con el programa Matlab (2012) se hizo un análisis de componentes principales (ACP) de las variables fenológicas obtenidas con TIMESAT, estandarizadas. Con los primeros cinco componentes (que incluyeron cerca de 99 % de la variación) se realizó una clasificación no supervisada con el algoritmo k-means de Matlab, de 250 clases, con el fin de agrupar los píxeles estadísticamente similares (Campbell, 2002). El algoritmo k-means es el más utilizado en las clasificaciones no supervisadas, por su probada eficiencia en la detección de grupos dentro de conjuntos grandes de datos (típicamente,

Construction of the CYCL2000 map. Using Matlab (2012) software, principal component analysis (PCA) of the standardized phenological variables obtained with TIMESAT was performed. With the first five components (comprising about 99 % of the variance), an unsupervised classification of 250 classes was performed with the Matlab k-means algorithm in order to cluster statistically similar pixels (Campbell, 2002). The k-means algorithm is the most widely used in unsupervised classifications, due to its proven efficiency in detecting clusters within large datasets (typically the pixels of an image). The number of clusters (k) is set *a priori* and must ensure that different data (pixels) are not included in the same group. It is also important that each datum contains enough information, corresponding to the size of the database (in this case, the number of principal components used); the quality of the result mainly depends on the characteristics of the data. To label the clusters obtained and re-cluster them into categories, it is necessary to use a reference or prior knowledge (Kanungo et al., 2002).

The set of phenological values calculated from the time series for each pixel, as well as the derived PC, constitute its phenological signature (by analogy with the spectral signature of a multiband image), which means that each of the 250 classes implicitly corresponds to a phenological group.

CUADRO 2. Variables obtenidas por TIMESAT sobre una serie de tiempo.

TABLE 2. Variables obtained by TIMESAT on a time series.

Variable / Variable	Descripción / Description
1. Inicio de estación / Start of season	Tiempo para el cual la amplitud de estación se ha incrementado con respecto al nivel mínimo izquierdo, una cantidad definida por el usuario (20 % para el caso de este trabajo) / Time for which the seasonal amplitude has increased with respect to the left minimum level, a user-defined number (20% in the case of this study)
2. Fin de estación / End of season	Tiempo para el cual la amplitud de estación ha disminuido con respecto al nivel mínimo derecho, una cantidad definida por el usuario (20 % para el caso de este trabajo) / Time for which the seasonal amplitude has decreased with respect to the right minimum level, a user-defined number (20 % in the case of this study)
3. Longitud de estación / Length of season	Tiempo entre el comienzo y el fin de la estación / Time between the start and end of the season.
4. Mínimo / Minimum	Promedio de los valores mínimos izquierdo y derecho / Average of the left and right minimum values
5. Mitad de estación / Middle of season	Media de los tiempos para los cuales el límite izquierdo ha incrementado a 80 % de su nivel y el límite derecho ha decrecido a 80 % de su nivel / Mean of the times for which the left edge has increased to 80% of its level and the right edge has decreased to 80 % of its level.
6. Máximo / Maximum	Valor del índice de área foliar (LAI) máximo / Value of maximum leaf area index (LAI)
7. Amplitud / Amplitude	Diferencia entre máximo y mínimo locales / Difference between the maximal value and the base level
8. Derivada izquierda / Left derivative	Razón entre el LAI al comienzo de la estación y el 80 % del nivel izquierdo, dividido por la diferencia de tiempo correspondiente / Ratio between the LAI at the start of the season and 80 % of the left level, divided by the corresponding time difference.
9. Derivada derecha / Right derivative	Razón entre los valores evaluados al fin de la estación y el 80 % de nivel derecho dividido por la diferencia de tiempo correspondiente / Ratio between the values assessed at the end of the season and 80 % of the right level, divided by the corresponding time difference.
10. Integral extendida / Large integral	Integral de la función que describe la estación desde el inicio hasta el final. Corresponde al LAI acumulado en el ciclo anual / Integral of the function describing the season from the start to the end. It corresponds to cumulative LAI in the annual cycle.
11. Integral corta / Small integral	Integral de la diferencia entre la función que describe la estación y el nivel base desde el inicio hasta el final. Corresponde al LAI total acumulado. / Integral of the difference between the function describing the season and the base level from season start to end. It corresponds to total cumulative LAI.

CUADRO 3. Valores de los parámetros de ajuste del algoritmo TIMESAT para el análisis de la serie de tiempo de LAI del proyecto CYCLOPES.

TABLE 3. Values of the fitted parameters of the TIMESAT algorithm for analysis of CYCLOPES project LAI time series.

Parámetros de ajuste de TIMESAT / TIMESAT-fitted parameters	Valores / Values
Inicio y fin de estación / Start and end of season	20 % (fecha en la que el valor del índice de área foliar (LAI) supera 20 % de la amplitud o diferencia entre el mínimo y máximo local) / 20 % (date on which the value of the leaf area index (LAI) exceeds 20 % of the amplitude or difference between the maximal value and the base level)
Tamaño de ventanas para el ajuste / Window size for fitting	5, 6, 7
Número de pasos de adaptación / Number of adaptation steps	3
Fuerza de adaptación / Strength of adaptation	2
Picos / Peaks	2
Amplitud baja / Low amplitude	0
Número de estaciones / Number of seasons	0.5 (una sola estación de crecimiento) / (one growing season)

los píxeles de una imagen). El número de grupos (k) se establece *a priori* y debe garantizar que no se incluyan datos (píxeles) diferentes en el mismo grupo. Asimismo, es importante que cada dato contenga información suficiente, lo que corresponde a la dimensión de la base de datos (en este caso, el número de componentes principales utilizados); la calidad del resultado depende principalmente de las características de los datos. Para etiquetar los grupos obtenidos y reagruparlos en categorías es necesario utilizar una referencia o conocimiento previo (Kanungo et al., 2002).

El conjunto de valores fenológicos calculados a partir de la serie de tiempo para cada píxel, así como los CP derivados, constituyen su firma fenológica (por analogía con la firma espectral de una imagen multibanda), lo que se traduce en que cada una de las 250 clases corresponde implícitamente a un grupo fenológico. Cada grupo fenológico fue etiquetado con el tipo de cobertura (BHP, BHC, CU, PM) con el que coincidía la mayor proporción de área en el mapa de referencia INF2000. De esta manera se obtuvo el mapa de cobertura CYCL2000.

Comparación del mapa CYCL2000 con INF2000. Los mapas CYCL2000 y INF2000 se compararon píxel a píxel y se construyó la matriz de confusión correspondiente, con el fin de evaluar el nivel de coincidencia entre los grupos fenológicos y los tipos de cobertura, así como la consistencia en la fenología de cada uno de éstos. En el supuesto de que el mapa de referencia es perfecto, la comparación se basa en la idea

Each phenological group was labeled with the cover type (EF, DF, CR, PS) that matched the highest proportion of area in the INF2000 reference map. The CYCL2000 cover map was obtained in this way.

Comparison of the CYCL2000 and INF2000 maps. The CYCL2000 and INF2000 maps were compared pixel by pixel and the corresponding confusion matrix was constructed in order to assess the matching level between the phenological groups and the cover types, as well as the consistency in the phenology of each of them. Assuming that the reference map is perfect, the comparison is based on the idea that if there is good separability between the phenology of the different covers, each will be formed by a certain subset of the 250 phenological groups and then the new CYCL2000 map will match the INF2000 reference one. However, if the phenological information is not discriminating enough, there will be a difference between the two maps that will depend on the cover types and, in particular, the degree of phenological similarity between them.

The following variables were calculated: percentage of pixels that share the same legend in the two maps (total accuracy); percentage of pixels of each cover that in the CYCL2000 map are classified the same as in the INF2000 map (corresponds to sensitivity and is linked to errors of commission); and the percentage of pixels of the INF2000 map that in the CYCL2000 map belong to the same cover class (corresponds to precision and is related to error of omission) (Congalton, 1991).

de que, si hay una buena separabilidad entre la fenología de las diferentes coberturas, cada una quedará conformada por un subconjunto de los 250 grupos fenológicos y entonces el nuevo mapa CYCL2000 coincidirá con el de referencia INF2000. No obstante, si la información fenológica no es lo suficientemente discriminante, existirá una diferencia entre los dos mapas que dependerá de los tipos de cobertura y, en particular, del grado de similitud fenológica entre ellos.

Las siguientes variables fueron calculadas: porcentaje de píxeles que comparten la misma leyenda en los dos mapas (exactitud total); porcentaje de píxeles de cada cobertura que en el mapa CYCL2000 están clasificados igual que en el mapa INF2000 (corresponde a la sensibilidad y está vinculado a errores de comisión); y el porcentaje de píxeles del mapa INF2000 que en el mapa CYCL2000 pertenecen a la misma clase de cobertura (corresponde a la precisión y se relaciona con el error de omisión) (Congalton, 1991).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización fenológica de cada tipo de vegetación

El análisis con TIMESAT de los datos CYCLOPES del año 2000 proporcionó el conjunto de 11 variables fenológicas de cada píxel. Las distribuciones aparecen en la Figura 3.

En los PM, el mínimo de LAI es el más bajo, pero el máximo es intermedio y la amplitud es alta. Los ritmos de incremento y decremento de LAI son los más altos después de los BHC. Los CU representan la cobertura más heterogénea, ya que incluyen desde agricultura de temporal hasta huertas de frutales. Los CU presentan un comportamiento fenológico muy parecido al de PM y es el tipo de vegetación que acumula menos LAI, la acumulación anual es similar a la de los BHP; los cuales inician la estación de crecimiento un poco más tarde y la terminan mucho después que los demás tipos de vegetación. Por tratarse de vegetación perenne, los BHP presentan un comportamiento estable a lo largo del año, con una estación de crecimiento poco marcada. En los BHC, por conformarse mayoritariamente de especies de hoja caduca, el mínimo de LAI es muy bajo; sin embargo, el máximo y la amplitud son los más altos de todos los tipos de vegetación. Esta vegetación presenta el ritmo de crecimiento más rápido al inicio de la temporada y un ritmo alto de decremento al final, junto con CU y PM. Todo esto explica que los BHC sean el tipo de vegetación que acumula más LAI a lo largo del año, lo cual se refleja en el valor de las integrales corta y extendida.

En la Figura 4 se muestra el perfil fenológico promedio de cada tipo de vegetación. Es importante enfatizar que el elemento más discriminante entre los tipos de cobertura considerados, desde el punto de vista fenológico, es el carácter caducifolio o perennifolio de la vegetación. La diferencia más evidente entre los perfiles fenológicos corresponde al mínimo de LAI; en el bosque de hoja perenne siempre se

RESULTS AND DISCUSSION

Phenological characterization of each vegetation type

The analysis with TIMESAT of the CYCLOPES data for the year 2000 provided the set of 11 phenological variables from each pixel. The distributions are shown in Figure 3.

In PS, the minimum LAI is the lowest, but the maximum is intermediate and the amplitude is high. The rates of LAI increase and decrease are the highest after DF. CR represent the most heterogeneous cover, since they range from rain-fed agriculture to fruit orchards. CR have a very similar phenological behavior to that of PS, and it is the vegetation type that accumulates the lowest LAI, although the annual accumulation is similar to that of EF. In regard to the latter, their growing season starts a little later and ends much later than the other vegetation types. Being perennial vegetation, EF have stable behavior throughout the year, with a slightly marked growing season. In DF, being mostly deciduous species, the minimum LAI is very low; however, the maximum and the amplitude are the highest of all the vegetation types. This vegetation has the fastest growth rate at the start of the season and a high rate of decrease at the end, along with CR and PS. All this explains why DF are the vegetation type that accumulates more LAI throughout the year, which is reflected in the value of the large and short integrals.

Figure 4 shows the average phenological profile of each vegetation type. It is important to emphasize that the most discriminating element among the cover types considered, from a phenological standpoint, is the deciduous or evergreen nature of the vegetation. The most evident difference among the profiles is the minimum LAI; in the evergreen forest, it always remains above 1, whereas in the case of deciduous vegetation it is less than 0.5. While in the spring (May-June) there seems to be no differences in the way the covers begin vegetative growth (left derivative), the evergreen or deciduous character does have implications for how vegetation adapts in autumn-winter (October-January), which is at the end of the rains and the start of the dry season (right derivative).

The phenological differentiation between deciduous and evergreen vegetation should ensure good discrimination between the covers present in the study area, particularly coniferous forests (EF) and tropical dry forest (DF). However, the oak forests (which in some cases are deciduous, so phenologically they could be assimilated into the shrubland or tropical dry forest) have been grouped in the EF cover, for being combined with pines in mixed forests (Table 1). This can cause confusion when using phenological characteristics to separate EF, DF and PS. On the other hand, the fruit orchards (particularly avocado), which occupy a large area in the state of Michoacán, phenologically resemble a broadleaf evergreen forest, while some crops share phenological characteristics with herbaceous vegetation. This can

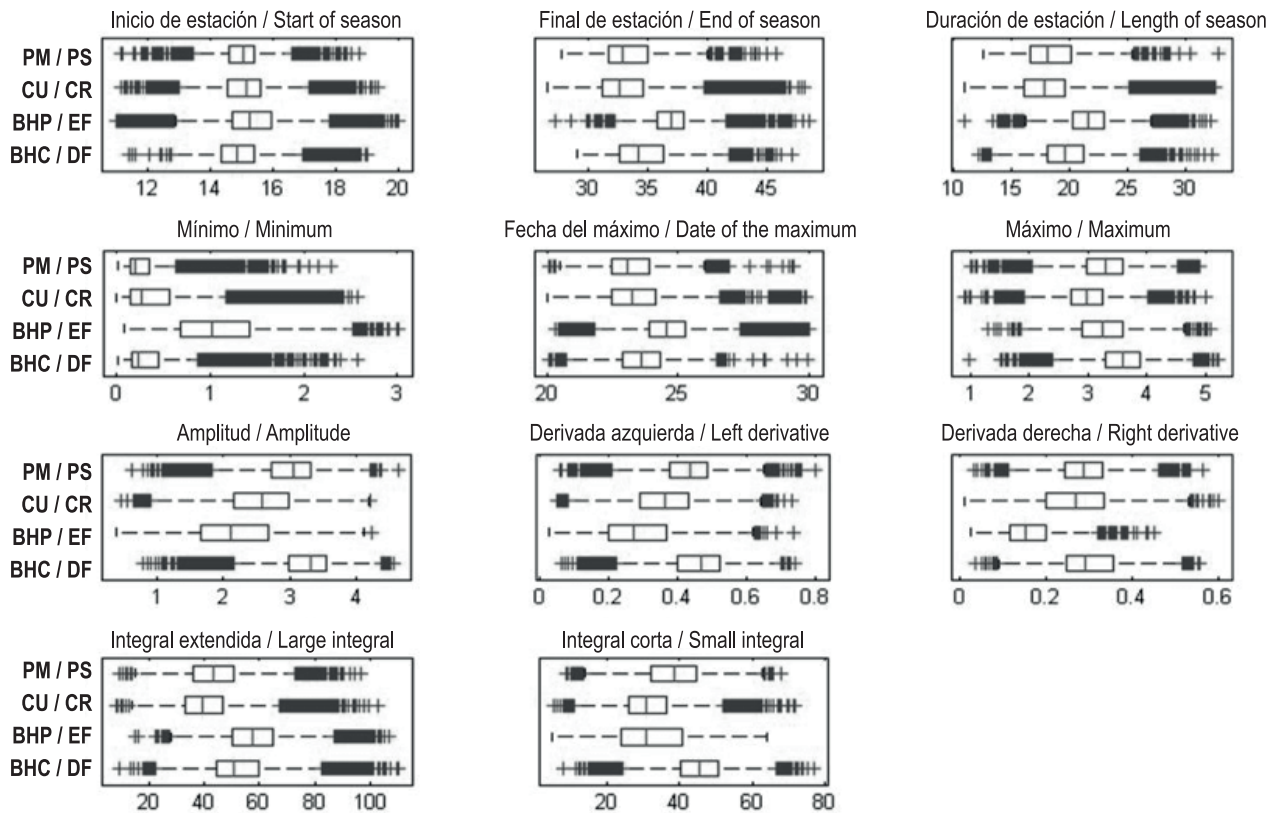


FIGURA 3. Distribución de cada una de las variables fenológicas obtenidas con TIMESAT, para cada tipo de cobertura (BHC: Bosque de hoja caduca, BHP: Bosque de hoja perenne, CU: cultivos, PM: Pastizal-matorral), calculadas para cada pixel de 1 km de resolución de la serie CYCLOPES del año 2000, en el estado de Michoacán, México. Los rectángulos (cajas) señalan los valores de las variables entre el segundo y tercer cuartil (25 %-75 % de los datos), la línea interior indica la mediana y las cruces representan los valores atípicos.

FIGURE 3. Distribution of each of the phenological variables obtained with TIMESAT, for each cover type (DF: Deciduous forest, EF: Evergreen forest, CR: Crops, PS: Pasture-shrubland), calculated for each pixel of 1-km resolution of the CYCLOPES series for the year 2000, in the state of Michoacán, Mexico. The rectangles (boxes) indicate the values of the variables between the second and third quartile (25 %-75 % of the data), the inner line indicates the median and the crosses represent the outliers.

mantiene por encima de 1, mientras que en el caso de vegetaciones caducifolias es menor de 0.5. Si bien en primavera (mayo-junio) no parece haber diferencias en la forma en que las coberturas inician el desarrollo vegetativo (derivada izquierda), el carácter perennifolio o caducifolio sí tiene implicaciones en la forma en que la vegetación se adapta en otoño-invierno (octubre-enero) que es el final de las lluvias e inicio de la temporada seca (derivada derecha).

La diferenciación fenológica entre vegetación caducifolia y perennifolia debería asegurar una buena discriminación entre las coberturas presentes en la zona de estudio, en particular los bosques de coníferas (BHP) y la selva baja (BHC). Sin embargo, los bosques de encino (que en algunos casos son caducifolios, por lo que fenológicamente podrían asimilarse a los matorrales o a la selva) han quedado agrupados en la cobertura BHP, por encontrarse combinados con los pinos en bosques mixtos (Cuadro 1). Esto puede dar lugar a confusiones, al utilizar las características fenológicas para

lead to confusion among the CR (in which both rain-fed and evergreen agriculture are included), EF and DF covers.

Construction of the CYCL2000 cover map

Table 4 shows the principal components calculated from the 11 phenological variables. The first three components retain about 90 % of the variance and the first five, almost 100 %, so they retain most of the information and can be used instead of the 11 original variables.

The most discriminating phenological variables are closely related to the evergreen or deciduous nature of the vegetation: the minimum LAI, the right derivative and the end of season (PC1); the maximum LAI, the extended and short integrals (PC2); and the start, middle and length of season (CP3). These results are consistent with the phenological profiles of the vegetation types shown in Figure 4, whereas Figure 5 shows the CYCL2000 vegetation map obtained

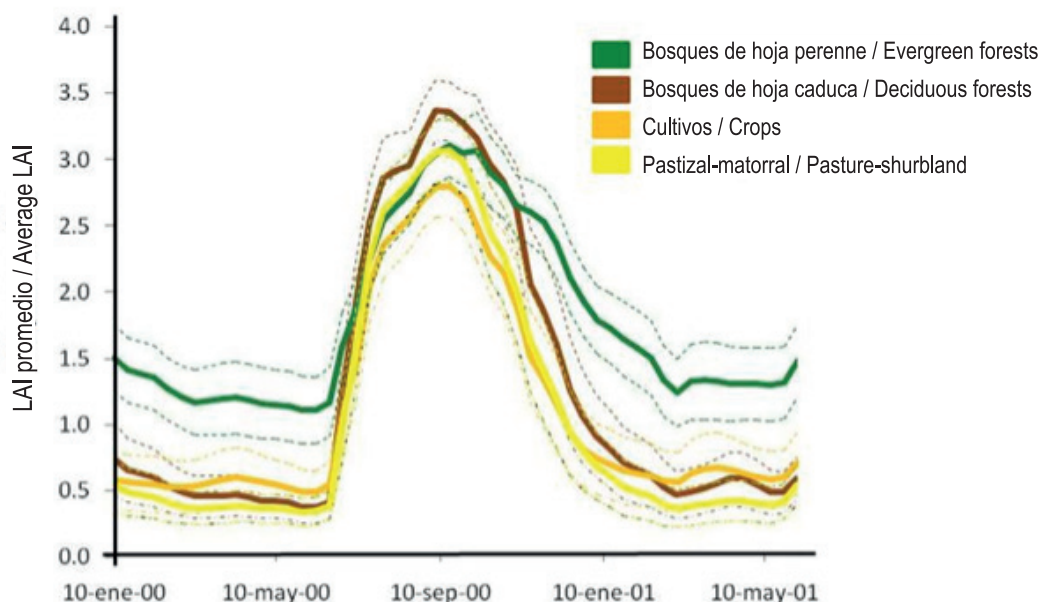


FIGURA 4. Perfiles temporales del índice de área foliar (LAI) de los principales tipos de vegetación en el estado de Michoacán para el año 2000. En línea continua se muestra el promedio y en punteada la desviación estándar.

FIGURE 4. Temporal profiles of the leaf area index (LAI) of the main vegetation types in the state of Michoacán for the year 2000. The solid line shows the average and the dotted line the standard deviation.

separar BHP, BHC y PM. Por otra parte, las huertas de frutales (en particular de aguacate), que ocupan una extensión importante en el estado de Michoacán, se asemejan fenológicamente a un bosque perennifolio de hoja ancha, mientras que algunos cultivos comparten características fenológicas con la vegetación herbácea. Esto puede generar una confusión entre la cobertura CU (en la que se encuentran incluidas tanto la agricultura de temporal como la perennifolia), BHP y BHC.

Construcción del mapa de cobertura CYCL2000

En el Cuadro 4 se muestran los componentes principales calculados a partir de las 11 variables fenológicas. Los tres primeros componentes retienen alrededor del 90 % de la varianza y los cinco primeros, casi el 100 %, por lo que conservan la mayor parte de la información y pueden utilizarse en lugar de las 11 variables originales.

Las variables fenológicas más discriminantes están muy relacionadas con el carácter caducifolio o perennifolio de la vegetación: el mínimo de LAI, la derivada derecha y el fin de estación (CP1); el máximo de LAI, las integrales extendida y corta (CP2); así como el inicio, mitad y longitud de estación (CP3). Estos resultados son coherentes con los perfiles fenológicos de los tipos de vegetación que aparecen en la Figura 4. La Figura 5 muestra el mapa de vegetación CYCL2000 obtenido de reagrupar los 250 grupos fenológicos en cuatro tipos de vegetación (CU, PM, BHP, BHC).

from reclustering the 250 phenological groups into four vegetation types (CR, PS, EF, DF).

Comparison of the CYCL2000 map with the INF2000 reference map

Table 5 shows the confusion matrix between the INF2000 and CYCL2000 maps. In total, 63 % of the pixels match between the two maps, implying a modest but slightly higher performance than that obtained in global maps. For example, the GLC2000 (Global Land Cover) map, also made for the year 2000 considering 27 cover types, had 68.8 % total accuracy, being considerably lower for heterogeneous landscapes compared to homogeneous sites (Pfeifer et al., 2011). On the other hand, Valderrama-Landeros, Baret, and España-Boquera (2011) compared global maps with a reference map (National Commission for the Knowledge and Use of Biodiversity [CONABIO] of Mexico) of Michoacán state and obtained 45.6 % maximum accuracy, corresponding to the GLOBCOVER map built in the GMES framework. This gives an idea of the difficulty of classifying the study area in an automatic way, given its heterogeneity.

The best identified cover type is DF, since 80.1 % of the pixels that in the INF2000 map are DF were correctly identified in the CYCL2000 map; the remaining 20 % was identified as CR (10.9 %), EF (6.4 %) and to a lesser extent PS. On the other hand, of all the pixels that are DF in CYCL2000, only 62.1 % of them are also in the INF2000 reference map, while the rest corresponds to PS (17.6 %) and CR (13.3 %).

CUADRO 4. Factores obtenidos para la construcción de los cinco primeros componentes principales de las variables fenológicas obtenidas por TIMESAT de la serie de tiempo de LAI del proyecto CYCLOPES, del estado de Michoacán para el año 2000.

TABLE 4. Factors obtained for the construction of the first five principal components of the phenological variables obtained by TIMESAT from the CYCLOPES project LAI time series, for the state of Michoacán for the year 2000.

VARIABLES ORIGINALES / ORIGINAL VARIABLES	CP1 / PC1	CP2 / PC2	CP3 / PC3	CP4 / PC4	CP5 / PC5
1. Inicio de estación / Start of season	0.045	-0.026	-0.773*	-0.281	-0.264
2. Fin de estación / End of season	0.361*	-0.290	-0.136	0.199	-0.282
3. Longitud de estación / Length of season	0.339	-0.279	0.262*	0.346	-0.148
4. Mínimo / Minimum	0.421*	-0.020	0.072	-0.517	0.318
5. Mitad de estación / Middle of season	0.284	-0.128	-0.512*	0.415	0.360
6. Máximo / Maximum	-0.064	-0.467*	-0.003	-0.382	0.297
7. Amplitud / Amplitude	-0.341	-0.349	-0.052	0.061	0.010
8. Derivada izquierda / Left derivative	-0.338	-0.305	-0.041	-0.241	-0.379
9. Derivada derecha / Right derivative	-0.413*	-0.055	-0.131	0.209	0.570
10. Integral extendida / Large integral	0.251	-0.410*	0.149	-0.166	0.167
11. Integral corta / Small integral	-0.159	-0.463*	0.064	0.210	-0.105
Varianza acumulada (%) / Cumulative variance (%)	41.5	77.5	89	94	98

*Variables con mayor peso en cada componente

*Variables with greatest weight in each component

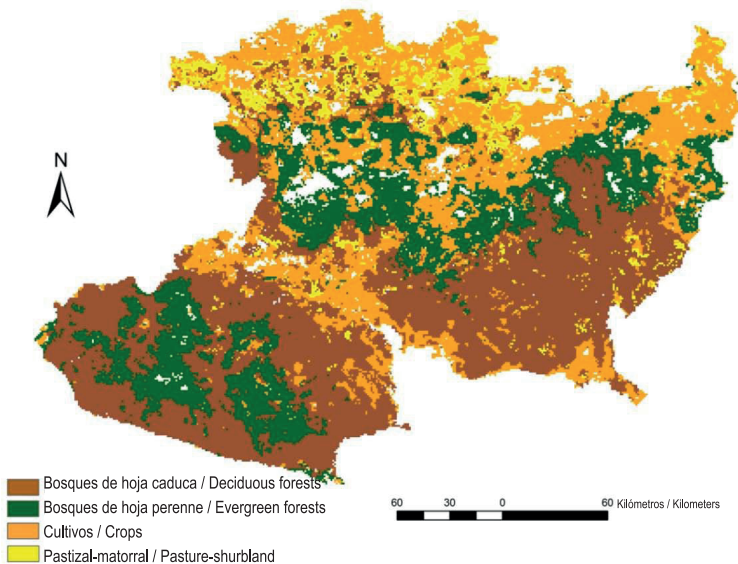


FIGURA 5. Mapa de vegetación CYCL2000. Las áreas sin color dentro del mapa corresponden a las zonas sin información fenológica debido a problemas de huecos (nubosidad) o bien a objetos sin fenología (cuerpos de agua y zonas urbanas).

FIGURE 5. CYCL2000 vegetation map. Areas with no color in the map correspond to areas without phenological information due to gap problems (cloudiness) or to objects without phenology (water bodies and urban areas).

Comparación del mapa CYCL2000 con el mapa de referencia INF2000

En el Cuadro 5 se muestra la matriz de confusión entre el mapa INF2000 y el mapa CYCL2000. El 63 % de los píxeles coinciden entre los dos mapas, lo que implica un desempeño modesto pero ligeramente superior al obtenido en mapas globales. Por ejemplo, el mapa GLC2000 (Global Land Cover), realizado también para el año 2000 considerando 27 tipos de cobertura, tuvo una precisión total de 68.8 %, siendo considerablemente más baja para paisajes heterogéneos en comparación con los sitios homogéneos (Pfeifer et al., 2011). Por otra parte, Valderrama-Landeros, Baret, y España-Boquera (2011) compararon mapas globales con un mapa de referencia (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO] de México) del estado de Michoacán y obtuvieron una exactitud máxima de 45.6 %, correspondiente al mapa GLOBCOVER construido en el marco del GMES. Esto da una idea de la dificultad de clasificar la zona de estudio de manera automática, dada su heterogeneidad.

El tipo de cobertura mejor identificado es el BHC, ya que 80.1 % de los píxeles que en el mapa INF2000 son BHC fueron correctamente identificados en el mapa CYCL2000; el 20 % restante fue identificado como CU (10.9 %), BHP (6.4 %) y en menor medida PM. Por otra parte, del total de píxeles que son BHC en CYCL2000, sólo 62.1 % lo es también en el mapa de referencia INF2000, mientras que el resto corresponde a PM (17.6 %) y CU (13.3 %). Estos tres

These three cover types share some phenological characteristics, in particular the rate of LAI decrease at the end of the growing season, which is one of the most discriminating variables detected by PCA.

Evergreen forests, for their part, are the second best identified cover, given that 74.1 % of the pixels that in the INF2000 map are EF are also so in the CYCL2000 map. These errors of omission occurred by excluding areas that being EF in INF2000 were classified in CYCL2000 as DF (14 %) and CR (11.6 %). On the other hand, 69.9 % of the EF pixels in CYCL2000 correspond to this cover in INF2000, so EF have the highest matching percentage with the reference map. The errors were associated with the inclusion of areas in the CYCL2000 map EF cover, which according to the INF2000 map correspond to CR (15.5 %), DF (9.3 %) and to a lesser extent PS (5.3 %).

Crops (CR) had similar performances from the standpoint of errors of omission and commission: 62.9 % of the pixels that are CR according to INF2000 correspond to CR in CYCL2000, while 61.1 % of all pixels classified as CR in CYCL2000 correspond to this cover in INF2000. Errors of commission occurred by erroneously incorporating areas in CR, which according to the reference map are PS (18.9 %) or DF (11.8 %), along with some EF pixels (8.2 %). Errors of omission are also associated with DF (19.2 % of the CR pixels in the reference map) and EF (12 %), mainly. Finally, 16.9 % of PS pixels in INF2000 are also so in CYCL2000; thus, PS had the poorest performance. The most

CUADRO 5. Matriz de confusión entre el mapa de referencia INF2000 y el mapa CYCL2000 construido para la identificación de coberturas en el estado de Michoacán, México.

TABLE 5. Confusion matrix between the INF2000 reference map and the CYCL2000 map constructed for the identification of covers in the state of Michoacán, Mexico.

Mapa INF2000 / INF2000 map	Mapa CYCL2000 (Número de píxeles) / CYCL2000 map (Number of pixels)				
	BHC / DF	BHP / EF	CU / CR	PM / PS	Total
Bosques de hoja caduca (BHC) / Deciduous forests (DF)	15.423	1.230	2.096	507	19.256
Bosques de hoja perenne (BHP) / Evergreen forests (EF)	1.744	9.256	1.455	42	12.497
Cultivos (CU) / Crops (CR)	3.300	2.059	10.827	1.019	17.205
Pastizal-matorral (PM) / Pasture-shrubland (PS)	4.368	699	3.351	1.717	10.135
Total	24.835	13.244	17.729	3.285	59.093
Precisión (%) / Precision (%)	80.09	74.07	62.93	16.94	
Sensibilidad (%) / Sensitivity (%)	62.10	69.89	61.07	52.27	
Exactitud total (%) / Total accuracy (%)					62.99

tipos de cobertura comparten algunas características fenológicas, en particular el ritmo de decremento de LAI al final de la estación de crecimiento que es una de las variables más discriminantes detectadas por el ACP.

Los BHP, por su parte, son la segunda cobertura mejor identificada, dado que 74.1 % de los píxeles que en el mapa INF2000 son BHP, también lo son en el CYCL2000. Estos errores de omisión se dieron al excluir áreas que siendo BHP en INF2000 se clasificaron en CYCL2000 como BHC (14 %) y CU (11.6 %). Por otra parte, 69.9 % de los píxeles de BHP en CYCL2000 corresponden a esta cobertura en INF2000, por lo que los BHP tienen el porcentaje mayor de coincidencia con el mapa de referencia. Los errores estuvieron asociados con la inclusión de áreas en la cobertura BHP de CYCL2000, que según INF2000 corresponden a CU (15.5 %), BHC (9.3 %) y en menor proporción PM (5.3 %).

Los cultivos (CU) tuvieron desempeños similares desde el punto de vista de los errores de omisión y comisión: 62.9 % de los píxeles que son CU según INF2000, corresponden a CU en CYCL2000, mientras que 61.1 % del total de píxeles clasificados como CU en CYCL2000 corresponde a esta cobertura en INF2000. Los errores de comisión se dieron al incorporar áreas erróneamente en CU, que según el mapa de referencia son PM (18.9 %) o BHC (11.8 %), así como algunos píxeles de BHP (8.2 %). Los errores de omisión están asociados también con BHC (19.2 % de los píxeles de CU en el mapa de referencia) y BHP (12 %), principalmente.

Finalmente, 16.9 % de píxeles de PM en INF2000 también lo son en CYCL2000; de esta forma, los PM tuvieron el desempeño más pobre. Los errores de omisión más graves se debieron a que superficies importantes que son PM en el mapa de referencia fueron clasificadas como BHC (43.1 %) o CU (33.1 %) en el nuevo mapa. El porcentaje de píxeles clasificados en CYCL2000 que son efectivamente PM según INF2000 también resultó modesto (52.3 %); del resto, 31 % corresponde a CU y 15.4 % a BHC. La cobertura PM comparte muchas de sus características fenológicas con CU; en algunos casos como en la derivada derecha, la distribución de valores queda completamente contenida dentro de CU. A su vez, ambas coberturas presentan traslapes con BHC en la distribución de las variables fenológicas.

CONCLUSIONES

Los patrones fenológicos contenidos en los datos de la serie de LAI del proyecto CYCLOPES, de Michoacán del año 2000, se analizaron considerando cuatro tipos de vegetación: cultivos, pastizal y matorral, bosques de hoja perenne y bosques de hoja caduca. Las principales diferencias corresponden al carácter caducifolio o perennifolio de cada tipo. A partir de la información fenológica y un mapa de referencia (INF2000) se construyó un mapa de cobertura (CYCL2000) agrupando píxeles similares en 250 grupos fenológicos. Cada grupo se asoció a la cobertura con la que

serious omission errors were due to the fact that significant areas that are PS in the reference map were classified as DF (43.1 %) or CR (33.1 %) in the new map. The percentage of pixels classified in CYCL2000 that are actually PS according to INF2000 was also modest (52.3 %); of the remainder, 31 % is CR and 15.4 % DF. The PS cover shares many of its phenological characteristics with CR; in some cases, as in the right derivative, the distribution of values is completely contained within the CR cover. In turn, both covers have overlaps with DF in the distribution of phenological variables.

CONCLUSIONS

The phenological patterns contained in the data of the CYCLOPES project LAI series for Michoacán for the year 2000 were analyzed considering four vegetation types: crops, pasture and shrubland, evergreen forests and deciduous forests. The main differences relate to the deciduous or evergreen character of each type. From the phenological information and a reference map (INF2000), a cover map (CYCL2000) was constructed by clustering similar pixels into 250 phenological groups. Each group was associated with the cover with which it had higher spatial coincidence in the reference map. Comparing the two maps yielded modest results, with 63 % total accuracy. The deciduous forests were the best identified (80.1 % of the reference map, 62.1 % of the constructed one), followed by evergreen forests (74.1 %, 69.9 %). The identification of evergreen forests is particularly interesting because of their relationship with deforestation processes. The phenological approach has limitations in terms of distinguishing some covers due to the lack of separability among them. The complexity of the study area means that, given the low spatial resolution of the data, the mixed pixels predominate.

ACKNOWLEDGMENTS

To Mexico's National Science and Technology Council (CONACYT) for granting a Ph.D. scholarship to L. Valderrama.

tuvieron mayor coincidencia espacial en el mapa de referencia. La comparación de los dos mapas arrojó resultados modestos, con exactitud total de 63 %. Los bosques de hoja caduca fueron los mejor identificados (80.1 % del mapa de referencia, 62.1 % del construido), seguidos de los de hoja perenne (74.1 %, 69.9 %). La identificación de los bosques de hoja perenne es particularmente interesante por su relación con los procesos de deforestación. El enfoque fenológico presenta limitaciones para distinguir algunas coberturas por la falta de separabilidad entre ellas. La complejidad de la zona de estudio hace que, dada la baja resolución espacial de los datos, predominen los píxeles mixtos.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT) por la beca de doctorado de L. Valderrama.

REFERENCIAS

- Achard, F., & Hansen, M. C. (2013). Use of Earth observation technology to monitor forest across the Globe. In F. Achard, & M. C. Hansen (Eds.), *Global forest monitoring from Earth observation* (pp. 39–54). New York, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Baret, F., Hagolle, O., Geiger, B., Bicheron, P., Miras, B., Huc, M., ..., Leroy, M. (2007). LAI, fAPAR and fCover CYCLOPES global products derived from VEGETATION. Part 1: Principles of the algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 110, 275–286. doi: 10.1016/j.rse.2007.02.018
- Campbell, J. B. (2002). *Introduction to remote sensing* (3rd. ed.). New York, USA: The Guilford Press.
- Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37(1), 35–46. doi: 10.1016/0034-4257(91)90048-B
- Couturier, S., Mas, J. F., López-Granados, E., Benítez, J., Tapia, V., & Vega, A. (2010). Accuracy assessment of the Mexican National Forest Inventory map: a study in four ecogeographical areas. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 31(2), 163–79. doi: 10.1111/j.1467-9493.2010.00399.x
- DeFries, R. (2013). Why forest monitoring matters for people and the planet. In F. Achard, & M. C. Hansen (Eds.), *Global forest monitoring from Earth observation* (pp. 1–14). New York, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Fisher, J. A. D., Frank, K. T., & Leggett, W. C. (2010). Dynamic macroecology on ecological time-scales. *Global Ecology and Bio-geography*, 19, 1–15. doi: 10.1111/j.1466-8238.2009.00482.x
- García, M. E. (1989). *Apuntes de climatología* (6a ed.). México, D.F.: UNAM.
- Geoland2. (2014). Dataset series catalogue. Consultado 20-05-2014 en <http://www.geoland2.eu>
- Gillespie, T. W., Foody, G. M., Rocchini, D., Giorgi, A. P., & Saatchi, S. (2008). Measuring and modelling biodiversity from space. *Progress in Physical Geography*, 32, 203–221. doi: 10.1177/0309133308093606
- Houghton, R. A. (2013). Role of forests and impact of deforestation in the global carbon cycle. In F. Achard, & M. C. Hansen (Eds.), *Global forest monitoring from Earth observation* (pp. 15–38). New York, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1985). *Síntesis geográfica del estado de Michoacán*. México: Autor.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2012). Marco geoestadístico municipal 2000, áreas geoestadísticas estatales. Consultado 12-06-2012 en http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/m_geoestadistico.aspx
- Jones, H. G., & Vaughan, R. A. (2010). *Remote sensing of vegetation. Principles, techniques and applications*. New York, USA: Oxford University Press.
- Jönsson, P., & Eklundh, L. (2004). TIMESAT: A program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers & Geosciences*, 30, 833–845. doi: 10.1016/j.cageo.2004.05.006
- Kandasamy, S., Baret, F., Verger, A., Neveux, P., & Weiss, M. (2012). A comparison of methods for smoothing and gap filling time series of remote sensing observations: Application to MODIS LAI products. *Biogeosciences Discussions*, 9, 17053–17097. doi:10.5194/bgd-9-17053-2012
- Kanungo, T., Mount, D. M., Netanyahu, N. S., Piatko, C. D., Silverman, R., & Wu, A. Y. (2002). An efficient k-means clustering algorithm: Analysis and implementation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24, 881–892. doi: 10.1109/TPAMI.2002.1017616
- Mas, J. F., Velázquez, A., Palacio-Prieto, J. L., Bocco, G., Peralta, A., & Prado, J. (2002). Assessing forest resources in Mexico: Wall to wall land use/cover mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 68(10), 966–968. Obtenido de <http://dialnet.unirioja.es/servlet/ejemplar?codigo=76311>
- Matlab, Mathematics Laboratory (2012). *Matlab: The language of technical computing*. Massachusetts, USA: The MathWorks, Inc.
- Miranda, F., & Hernández, X. (1963). Los tipos de vegetación de México y su clasificación. *Boletín de la Sociedad Botánica Mexicana*, 28, 29–179. Obtenido de http://www.cvirtual1.uaem.mx/observatorio/cen_documento/articulos/art_eco_1963.pdf
- Palacio-Prieto, J. L., Bocco, G., Velázquez, A., Mas, J. F., Takaki-Takaki, F., Victoria, A., ..., González, M. F. (2000). La condición actual de los recursos forestales en México: Resultados del Inventario Forestal Nacional 2000. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 43, 183–203.
- Petitjean, F., Inglada, J., & Gancarski, P. (2012). Satellite image time series analysis under time warping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(8), 3081–3095. doi: 10.1109/TGRS.2011.2179050
- Pfeifer, M., Disney, M., Quaife, T., & Marchant, R. (2011). Terrestrial ecosystems from space: A review of earth observation products for macroecology applications. *Global Ecology and Biogeography*, 21(6), 603–624. doi: 10.1111/j.1466-8238.2011.00712.x
- Rzadowsky, J. (1978). *Vegetación de México*. México, D.F.: Editorial Limusa.
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP). (1997). Estadísticas del Medio Ambiente. México, D.F.: INEGI. Obtenido de <http://www.semarnat.mx>

- gob.mx/archivosanteriores/informacionambiental/Documents/01_informes/informe_1997.pdf
- Valderrama-Landeros, L., Baret, F., & España-Boquera, M. L. (2011). Consistency between global and regional land cover maps over Michoacán state, Mexico. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17, 343–360. doi: 105154./r.rchscfa2010.09.075
- Velázquez, A., Mas, J. F., Bocco, G., & Palacio-Prieto, J. L. (2010). Mapping land cover changes in Mexico, 1976–2000 and applications for guiding environmental management policy. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 31(2), 152–162. doi: 10.1111/j.1467-9493.2010.00398.
- Weiss, M., Baret, F., Garrigues, S., Lacaze, R., & Bicheron, P. (2007). LAI, fAPAR and fCover CYCLOPES global products derived from VEGETATION. Part 2: Validation and comparison with MODIS Collection 4 products. *Remote Sensing of the Environment*, 110, 317–331. doi: 10.1016/j.rse.2007.02.018