

FENOLOGÍA DE AMBIENTES TROPICALES EN EL MARCO DE LA TELEDETECCIÓN

JESÚS A. ANAYA ACEVEDO¹, GERMÁN M. VALENCIA HERNÁNDEZ²

¹Universidad de Medellín, Carrera 87 Nro. 30-65, Medellín, Colombia

²Universidad de San Buenaventura, Carrera 56C Nro. 51-90, Medellín, Colombia

¹janaya@udem.edu.co ²especializacion.sig@usbmed.edu.co

RESUMEN

El principal objeto de estudio es el cambio de NDVI en la vegetación a lo largo del tiempo como aproximación a la fenología en el contexto de la teledetección. Las coberturas vegetales presentan diferentes patrones fenológicos debido a las estaciones en latitudes altas y el clima, pero se espera que estos patrones también puedan ser detectados en las series de tiempo NDVI ambientes tropicales. Trece sitios (una serie de tiempo para cada sitio) fueron seleccionados en la parte más septentrional de Sudamérica con el fin de evaluar la existencia de patrones temporales en el Trópico. Se encontró que los métricos de series de tiempo permiten identificar claramente los cultivos de arroz, caña de azúcar y pastos. Se encontraron patrones claros de NDVI para cultivos mixtos, monocultivos de arroz, palma africana, banano y café. Además, la comparación de bosques adyacentes deforestados y no-deforestados permitió determinar fechas de deforestación. Los sitios con alta cobertura de nubes no pueden estudiarse con este método.

Palabras clave: fenología, series de tiempo, NDVI, Colombia, TiSeG.

PHENOLOGY OF THE TROPICAL ENVIRONMENT IN THE CONTEXT OF REMOTE SENSING

ABSTRACT

The overall goal of this study is the change of vegetation NDVI as an approach to phenology within the context of remote sensing. Vegetation cover has different phenological patterns due to seasons at high latitude regions and climate. It is expected that this pattern can also be detected with NDVI time series in the tropical environment. Thirteen sites (a time series for each site) were selected in the northern part of South America as a mean to evaluate the existence of temporal patterns. It was found that metrics of time series allowed identifying rice crops, sugar cane crops and pastures. Clear patterns of NDVI for mixed crops, rice, palm oil, banana and coffee were also found. In addition, the comparison of natural forests and deforested forests allowed

determining the deforestation date. Those sites with high cloud content throughout the year must be discarded when using these methods.

Keywords: phenology, time series, NDVI, Colombia, TiSeG.

1. Introducción

Las plantas tienen eventos periódicos como la pérdida de hojas, la floración, la fructificación y la senescencia. En zonas templadas dicha actividad está bastante diferenciada en árboles latifoliados, con una marcada pérdida de hojas en el otoño, una actividad fotosintética baja o nula en invierno y, nuevamente, un período de crecimiento con la recuperación del área foliar en la primavera que alcanza el máximo en verano. El estudio de estos eventos que se repiten año a año de forma periódica se conoce como fenología y sus métodos se fundamentan en trabajo de campo exhaustivos. Los estudios fenológicos son una aproximación importante a la detección de cambios en los ecosistemas terrestres (De Beurs y Henebry, 2005) y, por tanto, permiten analizar la dinámica de la vegetación y el carbono.

La percepción remota ha sido ampliamente utilizada para hacer seguimientos de la vegetación ya que presenta ventajas significativas frente a estudios de campo. Esto principalmente porque permite abarcar grandes extensiones de terreno, facilita el acceso a información de archivo (histórica) y permite la caracterización de vegetación en zonas de difícil acceso. Sin embargo, la fenología en el ámbito de la teledetección es mucho menos detallada que la que se puede realizar en campo y no pretende hacer seguimiento a individuos ni especies en bosques naturales, menos en zona de tan alta biodiversidad como los Trópicos. En teledetección, la fenología se entiende como la dinámica de la vegetación debido al cambio en verdor. Esta dinámica está asociada a cambios en las características físicas y químicas de las plantas, específicamente, en la estructura de las hojas y en los procesos fotosintéticos. Existen diversos índices para representar el verdor, pero los más populares son el índice de vegetación normalizado NDVI y el índice de vegetación mejorado EVI, los cuales se basan en la reflectividad de longitudes de onda pertenecientes a la parte óptica del espectro electromagnético

En estudios de contexto regional y global se han utilizado datos AVHRR y MODIS para calcular los índices de vegetación (IV). AVHRR tiene una serie temporal que inicia en 1978, lo cual permite generar una serie de tiempo suficientemente larga para estudiar la dinámica de la vegetación y sus cambios (Myneni *et al.*, 1998; Potter *et al.*, 2003; Tucker *et al.*, 2001 y Brown *et al.*, 2006). Por su parte, MODIS fue diseñado para realizar estudios de vegetación, con mejores características en resolución espacial, exactitud horizontal y corrección atmosférica. La desventaja de MODIS frente a AVHRR es su serie temporal, que apenas supera su primera década. Una discusión más detallada de comparación de múltiples plataformas puede encontrarse en Gallo *et al.* (2005).

Las siguientes ecuaciones pertenecen a los IV NDVI y EVI, utilizados en estudios de caracterización de la vegetación:

$$\text{NDVI} = [(\text{IRC} - \text{Rojo}) / (\text{IRC} + \text{Rojo})] * 10.000$$

$$EVI = G * [(IRC - Rojo) / (C1 + IRC + C2 * Rojo - C3 * Azul)] * 10.000$$

Donde,

IRC: Infrarrojo cercano

NDVI: *Normalized difference vegetation index* (escalado 10.000)

EVI: *Enhanced Vegetation Index* (escalado 10.000)

C1 = 1,0 Factor ajustado para suelo desnudo

C2 = 6,0 Coeficiente de resistencia atmosférica

C3 = 7,5 Coeficiente de resistencia atmosférica

G = 2,5 *Gain factor*.

Ecuaciones tomadas de la guía del usuario de los IV MODIS (Solano *et al.*, 2010).

En climas templados se reconocen cuatro fechas de transición entre estados fenológicos distintos: 1) aumento en el verdor asociado a una alta actividad fotosintética; 2) madurez, asociado al máximo índice de área foliar; 3) senescencia, fecha en la cual la actividad fenológica disminuye drásticamente, y 4) latencia, cuando las actividades fisiológicas son mínimas, la radiación solar es baja, la vegetación puede estar cubierta por nieve y el acceso al agua en estado líquido es muy limitado (Zhang *et al.*, 2003). En ambientes tropicales, donde los cambios en el clima son menos drásticos (especialmente en temperatura e insolación) se presentan estados fenológicos menos marcados. De esta forma el cambio entre estados fenológicos de bosques siempre verdes no es tan evidente como en bosques dominados por especies caducifolias de latitudes altas. El caso de los cultivos es distinto, por la siembra y la cosecha.

El área de estudio corresponde al área continental de Colombia, cuyas condiciones son similares a las de Ecuador y Venezuela, donde se presenta un marcado clima tropical con importantes variaciones topográficas debido a la cordillera de los Andes. Los Andes tienen como efecto una alta variabilidad de pisos altitudinales y condiciones de precipitación marcadas por una altísima nubosidad que, a su vez, permite la existencia de diferentes tipos de ecosistemas y la posibilidad de establecimiento de diversos tipos de cultivo. En términos de vegetación también es importante anotar que la diversidad de especies de la costa pacífica colombiana ha sido catalogada como una de las más altas del planeta. Gentry y Faber-Langendoen (1991) estiman que existen más de 250 especies de árboles por hectárea con diámetro a la altura del pecho mayor o igual a 10 cm.

Los objetivos de este estudio son: 1) evaluar la posibilidad de generar series de tiempo en zonas de alta nubosidad; 2) evaluar diferencias entre series de tiempo para coberturas vegetales representativas de la zona de estudio; 3) encontrar ciclos en la serie de tiempo e inferir su significado, por ejemplo, deforestación, quemadas recurrentes o prácticas agrícolas en cultivos. Por tanto, el estudio corresponde a coberturas vegetales naturales o antrópicas que revisten importancia en cuanto a su conservación o su valor económico. Las coberturas seleccionadas para el análisis de series de tiempo y su ubicación se presentan en la Figura 1. Luego se presenta la forma en que se obtuvieron los índices de vegetación, cómo se trataron los píxeles inválidos y cómo se construyeron las series de tiempo. La existencia de ciclos o secuencias temporales podría permitir la identificación de coberturas vegetales y mejorar la exactitud de mapas de cobertura del suelo. Además, esta información podría ser de utilidad para detectar la fecha de ocurrencia de deforestación, el seguimiento de monocultivos o cultivos mixtos y, por tanto, la toma de decisiones a escala general. También es importante para aquellos que estén interesados en la adaptación de

ecosistemas al cambio climático, o para quienes necesitan alimentar modelos de sensibilidad al mismo.

2. Revisión bibliográfica

Los estudios fenológicos se pueden realizar en campo a nivel de individuo a través de la colección de polen aéreo, con experimentos controlados o con modelos espaciales (Cleland *et al.*, 2007). En este estudio se hace una aproximación a la fenología con datos obtenidos por satélites para un sector del Neotrópico. Si bien los cambios fenológicos en regiones tropicales no son tan marcados como en regiones templadas, el clima puede limitar la productividad primaria por falta de agua o luz (van Schaik *et al.*, 1993) y determinar transiciones fenológicas. Por ejemplo, Huete *et al.* (2006) en sus estudios del comportamiento del índice de vegetación EVI en la Amazonía hablan de pulsos o aumentos de verdor. Otros estudios indican que los bosques siempre verdes también tienen fases fenológicas marcadas, como la pérdida de hojas de especies leñosas en la época seca (Sánchez-Azofeita *et al.*, 2003) o de un pico de productividad e inflorescencia al inicio de la época de lluvias (Reich y Borchert, 1982).

Chapman *et al.* (2005) aluden a la complejidad de la fenología en zonas tropicales, pues demuestran que existe un gran número de causas que dan pie a un amplio rango de patrones fenológicos entre especies. Por ejemplo, la precipitación tiene un alto control sobre la fenología en los *biomas* tropicales (Asner *et al.*, 2000), pero el efecto de las lluvias no es el mismo en ecosistemas con alto contenido de humedad (sumado a la capacidad de los árboles de acceder a aguas subterráneas a través de su sistema radicular) que en ecosistemas secos. De esta forma es de esperar que los valores medios de precipitación anual, la longitud de la temporada seca y la longitud de los períodos húmedos (distribución bimodal y unimodal) determinen diferentes patrones fenológicos. Un estudio detallado de la sincronidad entre la fenología y los regímenes de lluvias en bosques tropicales se puede encontrar en Park (2009).

Varios estudios basados en teledetección han sido llevados a cabo para caracterizar la vegetación utilizando series de tiempo (Wardlow *et al.*, 2008; Sakamoto *et al.*, 2005; Jakubauskas *et al.*, 2002). Anaya *et al.* (2009) relacionaron series de tiempo para los llanos de la cuenca del río Orinoco con datos TRMM (*Tropical Rainfall Measurement Mission*), y muestran una clara relación entre el cambio en IV con el cambio en precipitación; los máximos valores de IV intra-anales están precedidos de máximos en precipitación. Redo y Millington (2011) también incluyeron pastos en sus estudios de series de tiempo, pero además generaron series de tiempo que permiten diferenciar cultivos de un solo ciclo de cultivos de dos ciclos. Los cultivos de dos ciclos son cosechados dos veces y rotados con otros cultivos. Esto es de especial interés cuando se trabaja en aplicaciones de usos del suelo y coberturas del suelo LULC (*land use land cover*).

Para generar las series de tiempo es importante eliminar y reemplazar los píxeles inválidos con píxeles interpolados. Existen varios programas para generar series de tiempo, entre ellos, *Timesat*, *Time Stats*, *Hants* y *TiSeG*. Gran parte del esfuerzo en este estudio se centra en hacer una correcta implementación de los distintos parámetros para la construcción de las series de tiempo.

3. Materiales, datos y métodos

Una de las mayores dificultades de estudiar la fenología con teledetección son los píxeles inválidos. Una vez se identifican, estos píxeles deben reemplazarse mediante interpolaciones temporales. Para ello existen varias técnicas disponibles: lineal, polinomial y *spline*. De cualquier forma, cuanto menos datos válidos se tengan mayor es la incertidumbre de la interpolación. El análisis de calidad de los datos (píxeles inválidos) en ambientes tropicales se relaciona principalmente con la nubosidad, lo cual permitirá evaluar la posibilidad de utilizar esta técnica en sectores de la cordillera de los Andes, donde es bastante común la formación de nubes por efecto del relieve.

Las series de tiempo se construyeron con datos obtenidos por el sensor MODIS a bordo de Terra. Este sensor tiene la capacidad de obtener información en longitudes de onda correspondientes al rojo y al infrarrojo, con lo cual es posible el cálculo del índice de vegetación NDVI. Este índice está disponible de forma gratuita para uso científico bajo el nombre de MOD13A1. Una vez obtenidos los datos, se utilizó el programa *TiSeG* (Colditz y Conrad, 2008) para la construcción de series basadas en NDVI. Aquí se controlaron los aspectos de calidad e interpolación de datos inválidos.

3.1. El caso de estudio

Se realizó una selección de puntos críticos en términos de deforestación, cultivos, presencia-ausencia de nubes, bosques y pastizales (Llanos Orientales) con el fin de obtener puntos representativos para el área de estudio y que revistan interés ambiental o económico. Para cada uno de estos puntos se realizó el estudio de dinámica de la vegetación. En el departamento de Santander se seleccionó un sitio con baja ocurrencia de nubes, ubicado en la cuenca del río Suárez, en el municipio de El Socorro, llegando a superar las 200 horas de insolación para el mes de enero, según la estación de IDEAM No. 2401527. Como opuesto se seleccionó un sitio de alta nubosidad al oeste del páramo de Urrao, hacia los límites de los departamentos de Antioquia y Chocó. Como cuerpo de agua se seleccionó la laguna de Tota, en el departamento de Boyacá. Los cultivos de caña de azúcar y café fueron seleccionados del valle del Cauca y del municipio de Palestina (Caldas). En el altiplano de la meseta del norte de Antioquia se seleccionó un sitio como "cultivo mixto", caracterizado por lotes pequeños de diversos tipos de cultivos entre frutas y hortalizas. Para cultivos de arroz se seleccionó un área representativa al suroeste del municipio de Espinal (Tolima); los cultivos restantes de banano y palma africana fueron ubicados en el municipio de Apartadó (Urabá Antioqueño) y Aguachica (César), respectivamente. Finalmente, los bosques naturales corresponden a la cuenca del río León (RL), en Urabá, que vierte al mar Caribe, y del río Vaupés, que vierte al río Amazonas; en adelante se referirá como río Amazonas (RA). Los pastizales analizados están ubicados en los Llanos Orientales, en el departamento del Vichada, y el punto seleccionado tiene especial interés por las quemadas anuales asociadas a prácticas agrícolas identificadas por Anaya y Chuvieco (2010).

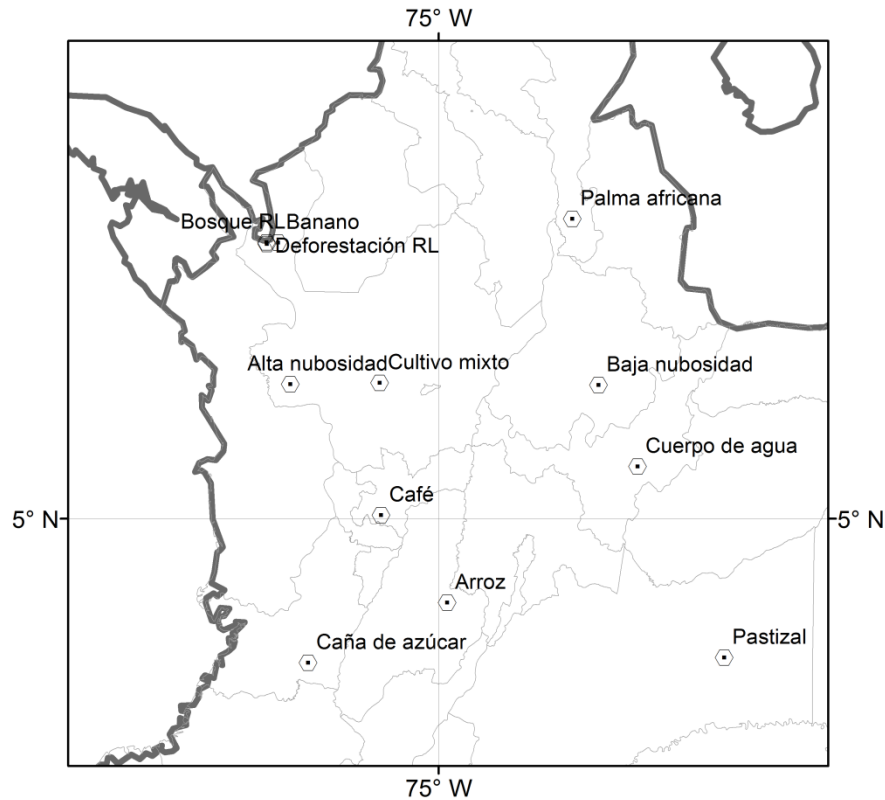


Figura 1. Ubicación de las series de tiempo

3.1.1. Delimitación espacial.

Para este estudio se seleccionó la ventana MODIS H10V08 que cubre la parte septentrional de los Andes de Sudamérica, en mayor parte a Colombia y Panamá, con algunos sectores de Venezuela y Ecuador. Allí se presenta una alta variedad de condiciones topográficas y climáticas que permiten evaluar el comportamiento de las series de tiempo en un rango muy variado de condiciones.

3.1.2. Delimitación temporal.

Se examina casi la totalidad de la serie de tiempo de MODIS, que abarca algo más de una década. La primera fecha examinada es de enero de 2001 hasta noviembre de 2011; en total son 250 fechas, cada una de 16 días debido a la resolución temporal de este compuesto. Para cada serie de tiempo se calcularon dos métricos con el fin de caracterizar numéricamente la serie: el valor promedio y la desviación estándar. Cada píxel en cada fecha de la serie corresponde a la mejor observación en 16 días, también conocido como compuesto. Esta selección de píxeles es crítica en zonas de alta nubosidad pues elimina datos inválidos y redundantes.

3.2. Obtención de los índices de vegetación y ubicación de series de tiempo

Se obtuvieron los datos de Terra MODIS H10V08. Para cada fecha es necesario descargar de Internet un fichero en formato jerárquico de datos DHF que contiene bandas ópticas, y los índices de vegetación NDVI y EVI; cada una de las capas del fichero corresponden al 72% del área de Colombia, que no incluye el océano Pacífico ni el mar Caribe. Se obtuvieron los productos estándar del sitio de Internet de NASA. La lista completa de productos puede consultarse en: <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/index.php>.

3.3. Construcción de series de tiempo.

La construcción de series de tiempo requiere de un análisis previo de calidad de los datos. Para ello se utilizó el *software* de construcción de series de tiempo *TiSeG*. La selección de calidad de datos fue lo suficientemente liberal para permitir la inclusión de píxeles con algún nivel de calidad menor al aceptable, esto debido a que el contenido de nubes es tan alto que una configuración muy exigente arrojaría pocos datos para el análisis. Se excluyó la estimación de aerosoles y no se permitió la existencia de píxeles con mezcla de nubes, como tampoco la nieve o las sombras. En cuanto a la interpolación para remplazar valores inválidos, se utilizó una interpolación lineal.

La figura 2 (a) muestra la frecuencia con que se presenta el acumulado de píxeles inválidos siguiendo la configuración descrita anteriormente. El valor con mayor frecuencia (> 50.000 píxeles) es de 100 observaciones inválidas de un total de 250. La media es 138 observaciones inválidas, mayor que la moda debido a mayores frecuencias hacia valores con altos acumulados de píxeles inválidos. De la figura 2 (b) se puede concluir que el 2% de los píxeles tiene hasta 20% de observaciones inválidas y, considerando la mitad de los datos, ya podríamos encontrar hasta el 50% de observaciones inválidas.

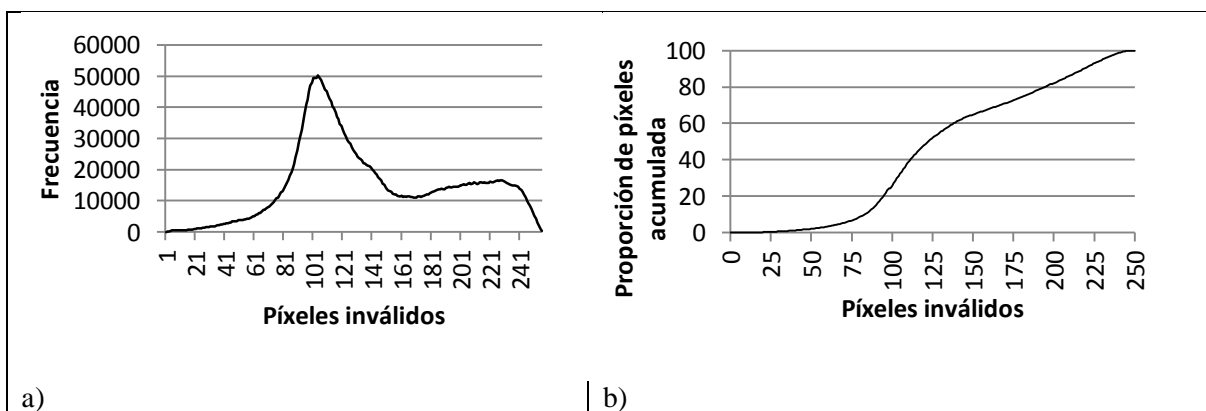


Figura 2. Frecuencia de píxeles inválidos acumulados y acumulado de píxeles inválidos.

El reto para generar las series de tiempo fue definir la configuración más adecuada para seleccionar píxeles inválidos. Los estimados de calidad de MOD13A1 permiten definir varios aspectos de calidad: calidad general, utilidad, cantidad de aerosoles, corrección BRDF, mezcla con nubes, máscaras de agua, existencia de nieve, sombras y confiabilidad. Utilizando *TiSeG*, se aceptaron como píxeles válidos aquellos con utilidad por encima de intermedios bajos y hasta perfectos, sin mezcla con nubes, nieve o sombras y con una confiabilidad marginal y buena. El parámetro de la estimación de cantidad de aerosoles depende mucho de la cadena de procesamiento y de la información de otros sensores, por tanto difícil de estimar y verificar, razón por la cual fue excluido. Una vez definidos los píxeles inválidos se realizó una interpolación lineal sin importar la magnitud temporal entre valores válidos, esto con el fin de asegurar valores válidos o interpolados para cada una de las 250 fechas. La cantidad de píxeles inválidos para cada una de las fechas se presenta en la figura 3.

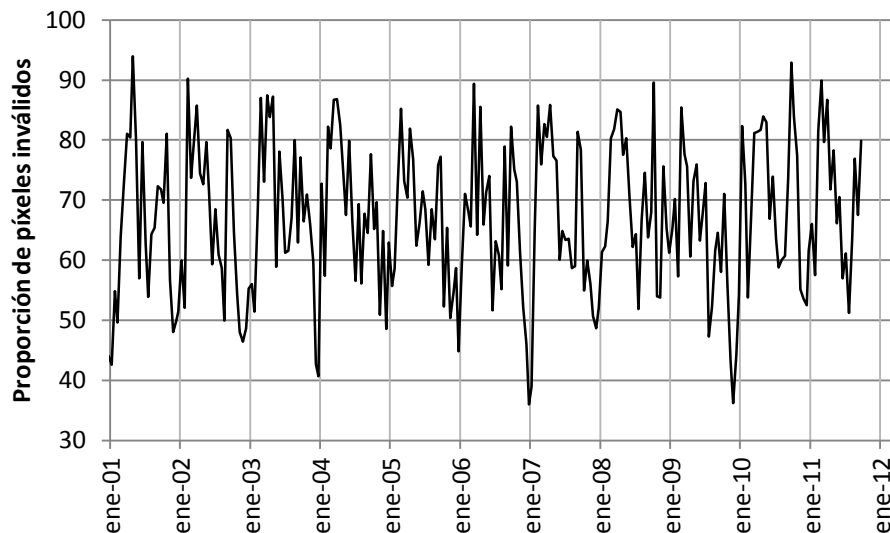


Figura 3. Distribución temporal de píxeles inválidos en la serie de tiempo para toda el área de estudio. Nótese la baja proporción de píxeles inválidos próximos a enero.

La proporción de píxeles inválidos varía considerablemente en la serie de tiempo debido a la dinámica climática que presenta el área de estudio. El clima tropical está gobernado por la zona de convergencia intertropical (ZCIT), una franja de bajas presiones con un ciclo que inicia su recorrido a principios de año desde el hemisferio sur hacia el norte y que tarda 6 meses. Mitchell y Wallace (1992) estiman que la posición media de la ZCIT es de 5°N y se desplaza entre los 6°S y los 12°N. Dado que el área de estudio se encuentra principalmente en el hemisferio norte, la época de menor nubosidad corresponde a las últimas semanas de diciembre o primeras semanas de enero. En la serie de tiempo de valores inválidos (Figura 3) se observa como todos los años, excepto en 2009 y parcialmente 2011, tienen la menor cantidad de observaciones inválidas durante finales de diciembre o principios de enero. Al interior de cada año se logra observar la tendencia del comportamiento bimodal, donde la primera moda es mayor que la segunda y las separa un período relativamente seco; sin embargo, también existen regímenes unimodales en la Amazonía, el Chocó y los Llanos Orientales.

Las coordenadas de los sitios listados en la Tabla 1 fueron obtenidas a partir de imágenes de alta resolución, asegurando definir un sitio representativo de la cobertura deseada en un radio superior a 1.500 m; con estas coordenadas se generó la serie de tiempo con píxeles válidos y con la interpolación de píxeles inválidos. Para cada sitio y en cada fecha (250 en total) se calculó el valor medio de NDVI y la desviación estándar de píxeles vecinos con una ventana de 3x3. La unión de los 250 valores NDVI generó la serie de tiempo para cada uno de los sitios (Figuras 5 y 6). En estas figuras las etiquetas de los ejes horizontales corresponden al inicio de cada año de la serie (2001-2011), mientras que las etiquetas de los ejes verticales corresponden al valor medio de NDVI escalado en 10.000. Las series de tiempo se presentan en pares para facilitar la comparación.

Tabla 1. Ubicación de las series de tiempo NDVI analizadas

Cobertura	Norte grados	Este grados	Altura SRTM (m)	NDVI Promedio	NDVI Desv. Est.	Clima
Bosque baja nubosidad	6 ,394	-73 ,328	1.044	7912	440	Templado húmedo Cálido muy
Bosque alta nubosidad	6 ,403	-76 ,551	598	7824	22	húmedo
Cuerpo de agua	5 ,544	-72 ,921	3.013	2415	1389	Muy frío muy seco
Caña de azúcar	3 ,493	-76 ,365	964	7324	654	Templado muy seco
Arroz	4 ,123	-74 ,912	328	6325	1065	Cálido seco
Café	5 ,036	-75 ,602	1.295	7917	433	Templado húmedo
Banano	7 ,882	-76 ,679	17	8098	411	Cálido húmedo
Palma africana	8 ,133	-73 ,604	83	8250	422	Cálido seco Cálido muy
Bosque RA	1 ,568	-70 ,618	205	8591	538	húmedo Cálido muy
Deforestación RL	7 ,870	-76 ,797	11	8162	436	húmedo Cálido muy
Bosque RL	7 ,887	-76 ,800	12	8375	315	húmedo
Pastizal	3 ,547	-72 ,014	202	5614	848	Cálido húmedo
Cultivo mixto	6 ,418	-75 ,616	2.532	7369	358	Frío seco

RL: Río León

RA: Río Amazonas

SRTM: altura estimada por el programa *Shuttle radar topography mission*

Desv. Est.: desviación estándar

Clima: mapa digital de ecosistemas, IDEAM (2007)

4. Descripción y análisis de resultados.

La serie NDVI de 250 fechas se generó para cada uno de los píxeles de la ventana MODIS H10V08, pero los análisis y resultados se centran en los 13 sitios elegidos. Para cada sitio se

calcularon dos métricos, la media y la desviación estándar de NDVI. En el sitio de alta nubosidad la interpolación es tan frecuente que la desviación estándar es extremadamente baja (Tabla 1). Por el contrario, el mayor valor de desviación estándar corresponde al cuerpo de agua, esto quizás debido a la reflectividad especular de este tipo de superficies. Esto se repite cuando se analiza la desviación estándar en la ventana de 3x3 (espacial), indicando la alta variabilidad en reflectividad, tanto en el espacio como en el tiempo. Otros valores especialmente altos son los de los cultivos de arroz, pastos y caña de azúcar, lo cual se explica por las prácticas agrícolas de alto contenido de humedad, quemas y cosecha, respectivamente. Los cultivos de café, banano, palma africana y los bosques presentan desviaciones estándar relativamente bajas. Los valores promedio de la serie NDVI son altos para los bosques y los cultivos de café, banano y palma africana. Son especialmente bajos en arroz, pastos y, obviamente, cuerpos de agua. La figura 4, si bien no permite observar la dinámica al interior de un año o entre años, permite hacer comparaciones cuantitativas que soportan lo que se describe anteriormente y discriminar entre distintos tipos de coberturas.

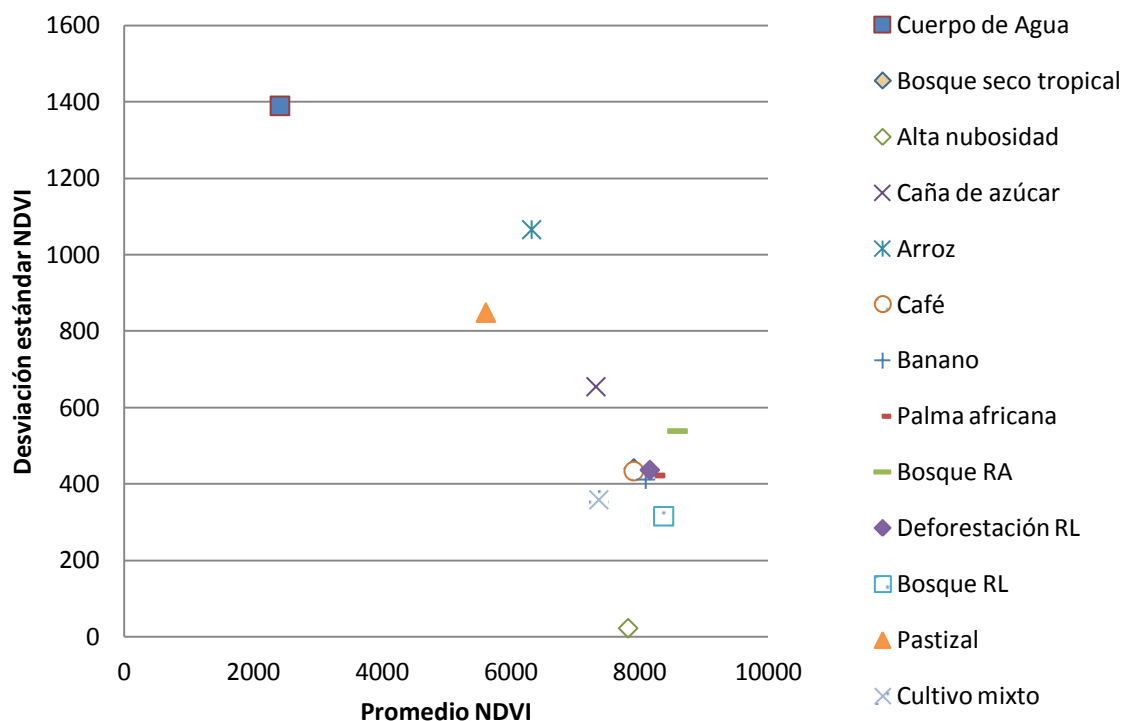


Figura 4. Valor promedio contra desviación estándar de los 250 valores de NDVI para cada una de las series de tiempo en los sitios seleccionados.

El análisis temporal de los píxeles inválidos corrobora la importancia de la ZCIT en el clima de Colombia. En toda la serie de tiempo es evidente un bajo contenido de nubosidad en los meses de diciembre y enero. El veranillo de julio-agosto, que ocurre en gran parte del área de estudio, no es tan claro debido al régimen unimodal de los Llanos Orientales, la Amazonía y el Chocó, que pueden presentar máximos de precipitación entre mayo y agosto. Algunas fechas son prácticamente

inservibles de cara a la construcción de las series de tiempo pues la proporción de píxeles inválidos supera el 90%; el caso opuesto se da a finales y principios de año, donde se presentan las proporciones más bajas de píxeles inválidos. Nueve de las once fechas entre diciembre y enero presentaron los días de menor contenido de nubes para toda la serie de tiempo; los compuestos con menor contenido de nubosidad (<40%) fueron en enero de los años 2007 y 2010.

Al comparar las series de tiempo de bosques con alta nubosidad de El Chocó y bosques de baja nubosidad de Santander se demuestra la diferencia en variabilidad inter-anual e intra-anual (figura 5). Esto se debe a que la mayoría de los datos de los bosques con alta nubosidad son inválidos y, por tanto, interpolados con pocas observaciones. En estas condiciones se hace imposible cualquier análisis fenológico. En cambio, las condiciones del bosque de baja nubosidad son las ideales para esta metodología dado que el número de píxeles inválidos es bajo y, por tanto, se tiene suficientes datos para no perder un posible ciclo fenológico, en este caso, siempre se observa en la época seca (enero) un clara disminución de NDVI. En cuanto al bosque húmedo de la Amazonía cabe resaltar que el mes de enero pierde importancia; la disminución en NDVI se hace común a mediados de año (ver los años 2001, 2003, 2004, 2006, 2009 y 2011), mientras que en el bosque del Pacífico no se observa ningún patrón claro.

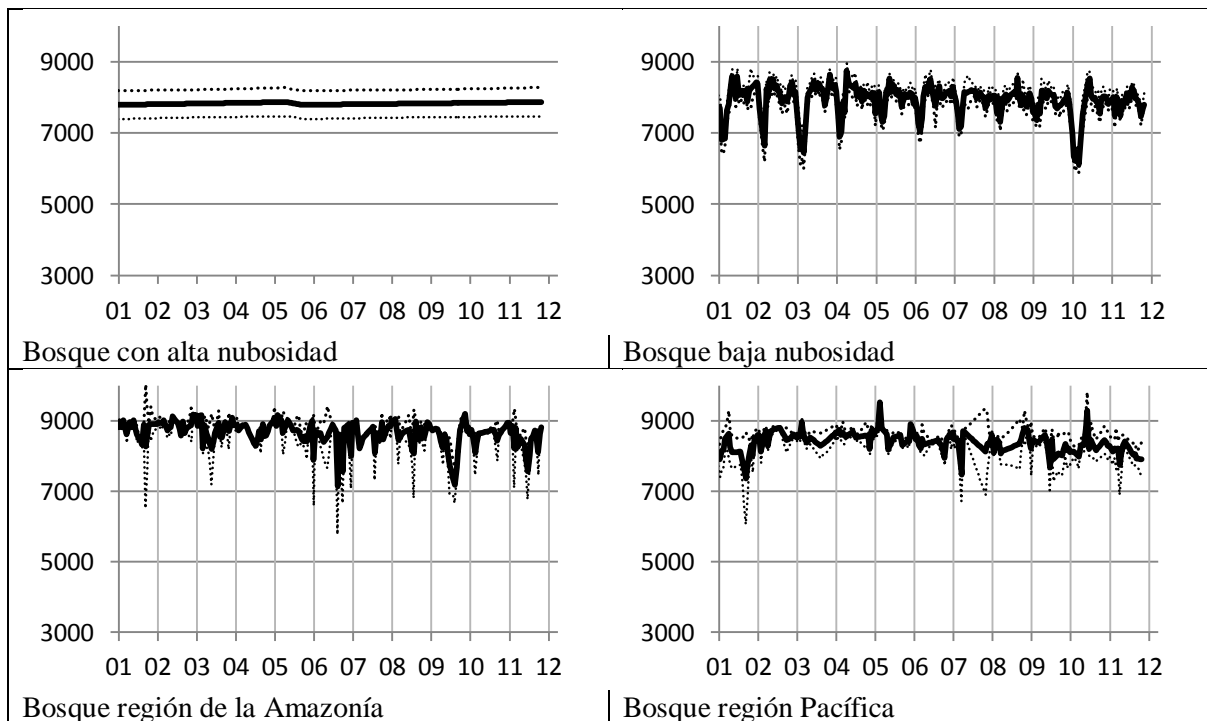


Figura 5. Valores de NDVI para diferentes tipos de bosques tropicales y contenido de nubosidad en la serie de tiempo MOD13A1, 2001-2011. La línea punteada muestra la desviación estándar calculada con los píxeles vecinos en una ventana de 3*3.

Anaya, J. y Valencia, G. (2013): "Fenología de ambientes tropicales en el marco de la Teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, n° 13-2, p.195-211. ISSN: 1578-5157

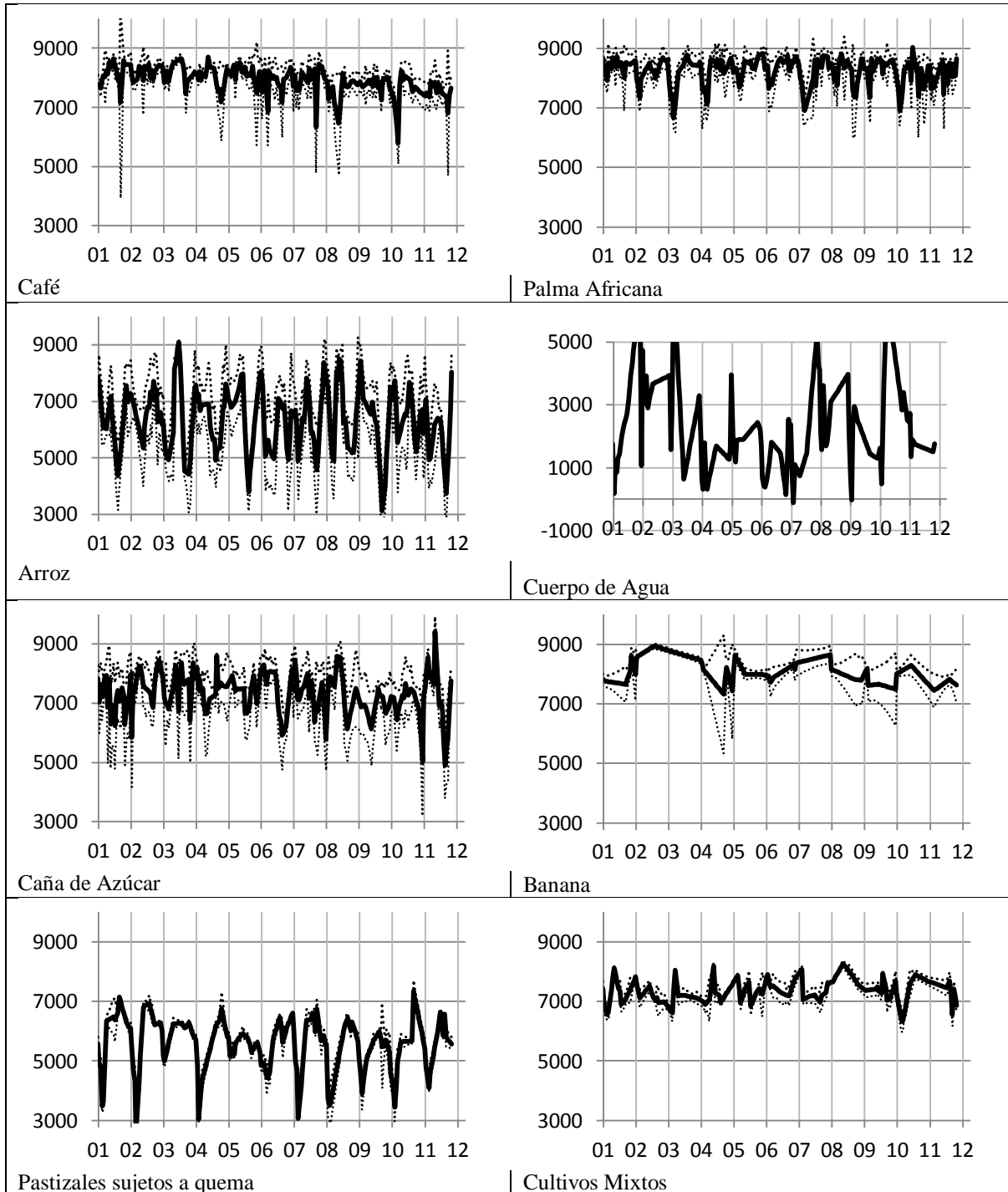


Figura 6. Valores de NDVI para diferentes tipos de cultivos en la serie de tiempo MOD13A1, 2001-2011. La línea punteada muestra la desviación estándar calculada con los píxeles vecinos en una ventana de 3*3.

El cultivo de café (figura 5) ha sido tradicional en la zona andina y muestra una tendencia de disminución inter-anual en NDVI durante los casi once años de observaciones. Esto generalmente se traduce como una pérdida en el vigor de la vegetación, específicamente en la disminución de la fotosíntesis y menor calidad en la estructura del mesófilo. Por otra parte, el sitio analizado para palma africana muestra una tendencia estable con valores próximos a 9000 de NDVI, pero con una clara disminución en las primeras semanas de enero. La figura 6 permite la comparación del cultivo de arroz con un cuerpo de agua y se observa que el cultivo estaría dominado por la presencia del agua con mayor frecuencia en la segunda mitad del año. Los valores del cuerpo de agua, a pesar de ser los valores más bajos de todas las series, aún presentan valores muy altos, especialmente en enero donde se presenta mayor variación, esto quizás debido a la presencia fitoplancton o de algún organismo fotosintético.

Los cultivos de caña de azúcar y banano no muestran ninguna tendencia especial. Nuevamente se encuentra poca variabilidad del banano debido al alto número de observaciones interpoladas; este cultivo está ubicado entre el golfo de Urabá y la serranía de Abibe, sometido a altos valores de precipitación y cobertura de nubes. Por el contrario, la caña de azúcar se encuentra ubicada en los valles interandinos con alta radiación a lo largo del año. Finalmente, otras dos coberturas sujetas a prácticas agrícolas son los cultivos mixtos y los pastizales para ganadería. Los primeros se caracterizan por la mezcla de distintos cultivos de verduras, hortalizas y frutales dispersas en zonas rurales; esta serie de tiempo encuentra resistencia en el valor NDVI de 7000, con lo cual no hay razón para pensar en la existencia de suelo desnudo en grandes extensiones para estos cultivos y que, a diferencia de otras coberturas, no se ve afectado por la época seca. Por el contrario, los pastizales tienen valores muy bajos en enero, incluso inferiores a 3000, lo cual indica valores muy distantes a los de la vegetación sana.

5. Discusión y valoración de hallazgos

Dado que la extensión espacial de la unidad mínima de los datos es de 25 ha, se debe considerar que la serie de tiempo de índices de vegetación corresponde a la tendencia temporal de una ecosistema natural, como lo es el caso de los bosques, más que al cambio fenológico de un individuo o de una especie en particular. El caso de los monocultivos es distinto pues se encuentran compuestos generalmente por una sola especie.

De 250 observaciones solo dos fueron válidas para bosques con alto contenido de nubes, por lo cual es imposible generar series de tiempo en estas condiciones; el caso opuesto se encontró para bosques con baja nubosidad, donde casi la totalidad de píxeles son válidos. El cuerpo de agua seleccionado como objeto negro presenta los valores más bajos de IV, pero se esperarían valores aún más bajos, cercanos a cero o incluso negativos. Los factores que pueden explicar este comportamiento sería la existencia de organismos fotosintéticos en la época seca, pues es justamente en enero donde se disparan estos valores; una razón que lleva a pensar que no se trata de un error de procedimiento es que los valores anómalos se presentan justo en los compuestos donde el contenido de nubes es el más bajo del año. Los valores de desviación estándar son llamativamente altos, tanto en el espacio como en el tiempo, es decir, ruido, con lo cual los cuerpos

de agua son de difícil análisis en las series de tiempo, probablemente debido a las características de reflectividad de este tipo de superficie.

La ZCIT afecta notablemente el proceso fenológico; en general se encuentra una disminución del NDVI en los meses de enero en el bosque de baja nubosidad, en la palma africana y en los pastizales. En el bosque amazónico se desplaza a mitad de año y en cultivos no se ve una tendencia clara, quizá por efectos de riego o por un régimen de precipitación opuesto al que genera por las bajas presiones la ZCIT. Es importante anotar que si bien existe un predominio bimodal también una parte importante de la zona de estudio corresponde a un régimen unimodal.

Dada la alta variabilidad intra-anual de los valores NDVI se evaluó la posibilidad de detectar deforestación utilizando las series de tiempo. Para ello se seleccionó un sitio de la cuenca del río León, sometido a alta presión de deforestación para agricultura y ganadería. Mediante dos imágenes de alta resolución se constató la deforestación ocurrida entre 2001 y 2011 (figura 7). Por tanto, se generaron dos series de tiempo, una para la zona deforestada y otra para la zona que aún permanece en bosque, donde se detectan claras diferencias en las tendencias NDVI en los años 2004 y 2010.

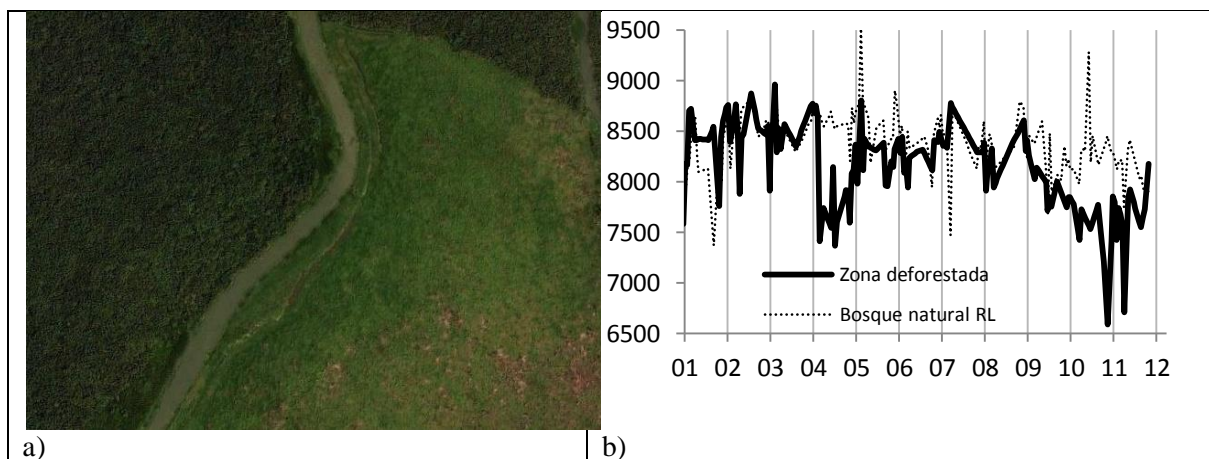


Figura 7. Series de tiempo NDVI 2001-2011. En la figura (a) se observa el río León con bosque natural a la izquierda y deforestación a la derecha. En la figura (b) se observan las series de tiempo para estos dos sitios, nótese como se desacoplan las series en 2004 y 2010.

6. Conclusiones

En este artículo se presentan las series de tiempo para distintas coberturas en ambientes tropicales considerados de importancia, bien sea por aspectos económicos o ambientales. El análisis de la media y la desviación estándar de cada una de las series demostró que los cultivos de caña de azúcar, arroz y pastizales pueden ser fácilmente discriminados de otras coberturas. Mientras que para este tipo de análisis resulta difícil separar café, banano y palma africana. Los mayores valores de desviación estándar se presentaron para los cuerpos de agua, mientras que los valores más bajos

se presentaron para las zonas de baja nubosidad. Esto último debido a la gran cantidad de valores interpolados.

Se demuestra la alta sensibilidad de la vegetación al clima y, por ende, puede considerarse una herramienta útil para prever los efectos del cambio climático. Se sugiere el uso de estos métodos en zonas secas y se descarta para zonas de alta nubosidad. En cuanto a los cultivos, también fue posible encontrar patrones en zonas de baja nubosidad, sin embargo, el uso de prácticas agrícolas como el riego o la cosecha deben ser mejor estudiadas para comprender el comportamiento de las series. La dinámica de prácticas agrícolas en cultivos hacen que los patrones fenológicos se encuentren lejos de un comportamiento genérico y, por tanto, de difícil caracterización. Por su parte, los pastos en uso de ganadería muestran un claro ciclo anual que inicia con mínimos en enero, debido a las quemadas, y una rápida recuperación hacia la primera época de lluvias, tal como lo reportan Anaya y Chuvieco (2010). Finalmente, los valores de NDVI permiten detectar la deforestación en bosques con un contenido relativamente alto de nubes, como es el caso del río León en Urabá, donde las series de tiempo se desacoplan para bosques deforestados y no deforestados en la fecha de ocurrencia de la deforestación.

Es importante disminuir el ruido de los datos válidos para tener mayor claridad sobre la existencia de ciclos; esto podría lograrse utilizando productos combinados Terra y Aqua. Para estudios más largos sería conveniente integrar datos AVHRR, a costa de perder resolución espacial. Como línea futura se propone incorporar a las series de tiempo datos del sensor VIIRS y datos MODIS con resolución espacial de 250 m.

Agradecimientos

A la Universidad de Medellín y a la Universidad de San Buenaventura por cofinanciar el proyecto de Sensoramiento Remoto. Los autores también quieren agradecer el apoyo del Dr. Rene Colditz y los comentarios de los evaluadores.

Referencias bibliográficas

Anaya, J.; Chuvieco, E. y Palacios-Orueta, A. (2009): "Aboveground biomass assessment in Colombia: A remote sensing approach", *Forest Ecology and Management*. 257, pp. 1237-1246.

Anaya, J. y Chuvieco, E. (2010): "Validación para Colombia de la estimación de área quemada del producto L3JRC para el periodo 2001-2007", *Actualidades Biológicas*, 32, 92, pp. 29-40.

Asner, G.P.; Townsend, A.R. y Braswell, B.H. (2000): "Satellite observation of El Niño effects on Amazon forest phenology and productivity", *Geophysical Research Letters*, 27, pp. 981-984.

Brown, M. E.; Pinzon, J, *et al.* (2006): "Evaluation of the Consistency of Long-Term NDVI Time Series Derived From AVHRR, SPOT-Vegetation, SeaWiFS, MODIS, and LandSAT ETM+ Sensors." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44, pp. 1787-1793.

Chapman, C.A.; Chapman, L.J.; Struhsaker, T.T.; Zanne, A.E.; Clark, C.J. y Poulsen, J.R. (2005): "A long term evaluation of fruiting phenology: importance of climate change", *Journal of Tropical Ecology*, 21, pp.31-45.

Cleland, E.E.; Chuine, I.; Menzel, A.; Mooney, H.A. y Schwartz, M.D. (2007): "Shifting plant phenology in response to global change", *Trends in Ecology and Evolution*, 22, pp. 357-365.

Colditz, R. R.; Conrad, C. *et al.* (2008): "TiSeG: A flexible software tool for time-series generation of MODIS data utilizing the quality assessment science data set", *IEEE*, 46,10, pp. 3296-3308.

De Beurs, K. M. y Henebry, G. M. (2005): "A statistical framework for the analysis of long image time series", *International Journal of Remote Sensing*, 26, 8, pp. 1551-1573.

Gallo, K.; Ji, L.; Reed, B.; Eidenshink, J. y Dwyer, J. (2005): "Multi-platform comparisons of MODIS and AVHRR normalized difference vegetation index data", *Remote Sensing of Environment*, 99(3), 221-231.

Gentry, A. y Faber-Langendoen (1991). "The structure and diversity of Rain forests at Bajo Calima, Chocó region, Western Colombia", *Biotropica* 23, 1, pp. 2-11.

Huete, A.R.; Didan, K.; Shimabukuro, Y.E.; Ratana, P.; Saleska, S.R.; Hutyrá, L.R.; Yang, Wenzé Y.; Nemani, R.R. y Myneni, R. (2006): "Amazon rainforest green-up with sunlight in dry season", *Geophysical research letters*. 33, pp. 1-4.

IDEAM (2007): *Ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia*. M. y. E. A. Instituto de Hidrología, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico Jhon von Neumann, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives De Andrés e Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas Sinchi. Bogotá, IDEAM: 276

Jakubauskas; Legates, D.R. y Kastens, H.J. (2001): "Crop identification using harmonic analysis of time series AVHRR NDVI data", *Computers and Electronics in Agriculture*, 37, pp. 127-139.

Mitchell, T.P. y Wallace, J.M. (1992): "The annual cycle in the equatorial convection and sea surface temperature", *Journal of Climate*, 5, pp. 1140-1156.

Myneni, R. B.; Tucker, C. J. *et al.* (1998): "Interannual variations in satellite-sensed vegetation index data from 1981 to 1991", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 103: 6145-6160.

Park, S. (2009): "Synchronicity between Satellite-Measured leaf phenology and rainfall regimes in tropical forests", *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 75, 10, pp. 1231-1237.

Reich, P. y Borchert, R. (1982): "Phenology and ecophysiology of the tropical tree, *Tabebuia neochrysantha* (Bignoniaceae)", *Ecology*, 63, pp. 294-299.

Potter, C.; Tan, P.-N. *et al.* (2003): "Major disturbance events in terrestrial ecosystems detected using global satellite data sets", *Global Change Biology*, 9, pp. 1005-1021.

Redo, D. J. y Millington, A. C. (2011): "A hybrid approach to mapping land-use modification and land-cover transition from MODIS time-series data: A case study from the Bolivian seasonal tropics", *Remote Sensing of Environment* 115, pp. 353-372.

Sakamoto, T.; Masayuki, Y.; Toritani, H.; Shibayama, M.; Ishitsuka N. y Ohno, H. (2005): "A crop phenology detection method using time-series MODIS data". *Remote Sensing of Environment*, 96, pp. 366-374.

Sanchez-Azofeifa; Kalacska, E.; Quesada, M.; Stoner, K.E.; Lobo, J.A. y Arroyo-Mora, P. (2003): *Phenology an integrative environmental science*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.

Anaya, J. y Valencia, G. (2013): "Fenología de ambientes tropicales en el marco de la Teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, n° 13-2, p.195-211. ISSN: 1578-5157

Solano, R.; Didan, K.; Jacobson, A. y Huete, A. (2010): "MODIS Vegetation Index User's Guide (MOD13 Series)", en *Vegetation Index and Phenology Lab*, The University of Arizona, 38, págs.

Tucker, C. J.; Slayback, D. *et al.* (2001): "Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999", *International journal of biometeorology*, 45, pp. 184-190.

van Schaik, C.P.; Terborgh, T.W. y Wright, S.J. (1993): "The phenology of tropical forests: adaptive significance and consequences for primary consumers", *Annual review of Ecology and Systematics*, 24, pp. 353-377.

Wardlow, B.D. y Egbert, S.L. (2008): "large-area crop mapping using time-series MODIS 250m NDVI data: An assessment for the U.S. Central Grate Plains", *Remote Sensing of Environment*, 112, 3, pp. 1096-1116.

Zhang, X.; Friedl, M. A.; Schaaf C.B.; Strahler A.H.; Hodges J.C.F.; Gao F.; Reed B.C. y Huete, A. (2003): "Monitoring vegetation phenology using MODIS", *Remote Sensing of Environment*, 84,3, pp. 471-475.