

CARACTERIZACIÓN FENOLÓGICA DE BOSQUES TROPICALES CADUCIFOLIOS USANDO INFORMACIÓN ESPECTRAL: EXPERIMENTOS CON COMPONENTES

Phenological Characterization of Tropical Forests Using Spectral Information: Experiments with Components

Marcos Casiano¹ y Fernando Paz^{1*}

RESUMEN

La caracterización de la fenología de la vegetación, particularmente la asociada a los bosques tropicales caducifolios, permite predecir los impactos del cambio climático y de los intercambios de carbono y agua entre la atmósfera y la vegetación, por lo que es importante modelarla. Existen diferentes métodos experimentales para caracterizar la fenología de la vegetación, sin embargo, el uso de sensores remotos permite caracterizaciones fenológicas de bajo costo y eficientes. No obstante lo anterior, la mayoría de las aplicaciones de sensores remotos cuando se usan índices de vegetación (IV) solo modelan el crecimiento del follaje (etapa vegetativa y senescente) y no la etapa reproductiva. Dado que la floración es crítica para la viabilidad de la vegetación, además de su valor en la apicultura, es necesario evaluarla con sensores remotos aerotransportados en el segmento visible a infrarrojo del espectro electromagnético. La revisión de experimentos y observaciones de floración muestran que los patrones temporales en las bandas del rojo (R) e infrarrojo cercano (IRC) son contrarios, lo cual no ocurre en los IV que caracterizan el follaje. A partir de estos análisis, se diseñó un experimento de componentes de la vegetación para simular las etapas fenológicas de pre floración, floración y post floración que hipotéticamente ocurren en un bosque caducifolio. Los resultados mostraron que es posible el desarrollo de un modelo fenológico aproximado si se usa el índice IVIS para caracterizar la inducción floral, el inicio y el pico de la floración, aunque el término

de ésta se confunde con el inicio del crecimiento vegetativo del follaje.

Palabras clave: índices de vegetación, floración, IVIS, vegetación caducifolia, modelo fenológico.

SUMMARY

The characterization of vegetation phenology, particularly that associated with deciduous tropical forests, is an important task in modeling to predict the impacts of climate change and the carbon and water exchanges between the atmosphere and vegetation. Although different experimental methods exist to characterize vegetation phenology, the use of remote sensing allows phenological characterizations that are inexpensive and efficient. Nevertheless, most applications using vegetation indices (VI) use only foliage growth cycle (vegetative and senescent stage) and not the reproductive stage. Flowering is critical to the viability of the vegetation, in addition to its value in apiculture, and it is important to assess it with airborne remote sensing in the visible to infrared segment of the electromagnetic spectrum. A review of experiments and observations of flowering show that the temporal patterns in the bands of red (R) and near infrared (NIR) are opposites, which does not occur in the IV characteristic foliage. From these analyses, an experiment of components was designed to simulate vegetation phenological stages, pre flowering, flowering and post flowering, that hypothetically occur in a deciduous forest. The results show that it is possible to develop an approximate model using the IVIS index to characterize floral induction, onset and peak of flowering, although the end of flowering is confused with the onset of vegetative growth of foliage.

¹ GRENASER. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, Estado de México.

* Autor responsable (ferpazpel@gmail.com)

Index words: *vegetation indices, flowering, IVIS, deciduous vegetation, phenological model.*

INTRODUCCIÓN

Por largo tiempo se han estudiado los patrones fenológicos de las plantas terrestres en relación con el medio ambiente y factores endógenos (Rathcke y Lacey, 1985). La caracterización de las etapas de desarrollo de la vegetación (fenología) permite conocer los patrones adaptativos de las plantas ante el cambio climático, al determinar los procesos biogeoquímicos asociados. El análisis del impacto del cambio climático (calentamiento global) en la fenología de la vegetación (Peñuelas y Filella, 2001; Schwartz *et al.*, 2006; Parry *et al.*, 2007), muestra efectos en el tiempo de las fases de desarrollo (floración, inicio del crecimiento del follaje, senescencia, latencia, etc.) de las plantas. Asimismo, los cambios fenológicos de la vegetación inciden en los flujos de carbono y agua entre la atmósfera y las plantas (Running y Nemani, 1991; White *et al.*, 1999; Wilson y Baldocchi, 2000; Kramer *et al.*, 2000), por lo que es importante caracterizar los estadios fenológicos; particularmente en relación con los tiempos de presentación, duración de los eventos y masividad (sincronización del evento en las especies de una comunidad) (Post *et al.*, 2008).

Los patrones fenológicos de la vegetación se estudian por el monitoreo directo de plantas o conjuntos de ellas in situ (Borchert, 1983; Heideman, 1989; Bullock y Solis-Magallanes, 1990). Este esquema tiene altos costos referente a la caracterización de ecosistemas terrestres, por lo que se buscan métodos alternativos tales como la observación en herbarios (Borchert, 1996; Ochoa-Gaona y Cruz-Arias, 2002) o la toma de fotografías digitales montadas en estructuras por encima de la vegetación (Richardson *et al.*, 2009; Parihar *et al.*, 2013), entre otros. Ante esto, la tecnología de los sensores remotos, dado su enfoque espacial exhaustivo y la temporalidad de las visitas a una misma área (pixel), plantea una solución eficiente y de bajo costo (Zhang *et al.*, 2012). La caracterización fenológica del crecimiento del follaje en biomasa o ecosistemas terrestres, a escala regional o global, se ha hecho con los sensores AVHRR (Shabanov *et al.*, 2002; Stöckli y Vidale, 2004), MODIS (Zhang y Anderson, 2004; Zhang *et al.*, 2006) y sensores del satélite Landsat (Fisher *et al.*, 2006). Para la modelación de la fenología se han utilizado diferentes índices de vegetación (IV) (Zhang *et al.*, 2012), de los que sobresalen el NDVI (Rouse *et al.*,

1974), el EVI (Liu y Huete, 1995) y el EVI2 (Jiang *et al.*, 2008), en los que los datos de los IV se filtran para reducir su variabilidad y poder detectar umbrales que definan los estadios fenológicos (Zhang *et al.*, 2012; Atkinson *et al.*, 2012); tarea más o menos exitosa, como una aproximación semi-empírica.

En el caso de la floración de la vegetación, los patrones se han estudiado poco a nivel satelital, por lo que se requiere del diseño de las bases metodológicas para su caracterización, particularmente si se consideran esquemas simultáneos de definición de los umbrales y fases del crecimiento del follaje. La floración es un estadio crítico para la viabilidad de la vegetación (Rathcke y Lacey, 1985), de tal manera que la definición de su presencia y duración, así como su intensidad, requiere del conocimiento de los factores que inciden en los umbrales de su inicio y terminación, los cuales son relativamente poco conocidos (Rathcke y Lacey, 1985; Primack, 1985). En términos económicos, la floración de los bosques tropicales con diferentes niveles de perturbación en la Península de Yucatán, como ejemplo, impacta en la apicultura de la región (INEGI, 2012), por lo que su caracterización es muy importante. Adicionalmente, los bosques tropicales en México almacenan las mayores cantidades de carbono de la biomasa viva de los ecosistemas del país (de Jong *et al.*, 2010), por lo que resulta indispensable conocer los patrones de evolución fenológicos ante el cambio climático y las intervenciones humanas.

PATRONES TEMPORALES Y ESPECTRALES DE LA VEGETACIÓN

Para poder caracterizar la fenología de la vegetación es conveniente analizarla en términos de dos ciclos relativamente diferentes: crecimiento y decrecimiento del follaje, así como floración; aunque en muchos casos ambos ciclos se presentan en forma combinada.

Crecimiento y Decrecimiento del Follaje

Se muestra en la Figura 1 de forma esquemática la evolución temporal de un índice de vegetación asociado al estadio del desarrollo del follaje y su senescencia, para el caso de bosques perennes (Figura 1a) y caducifolios (Figura 1b). Este patrón es típico en las caracterizaciones cuando se usan sensores remotos (Zhang y Anderson, 2004; Zhang *et al.*, 2006); aunque generalmente el patrón emerge en forma definida

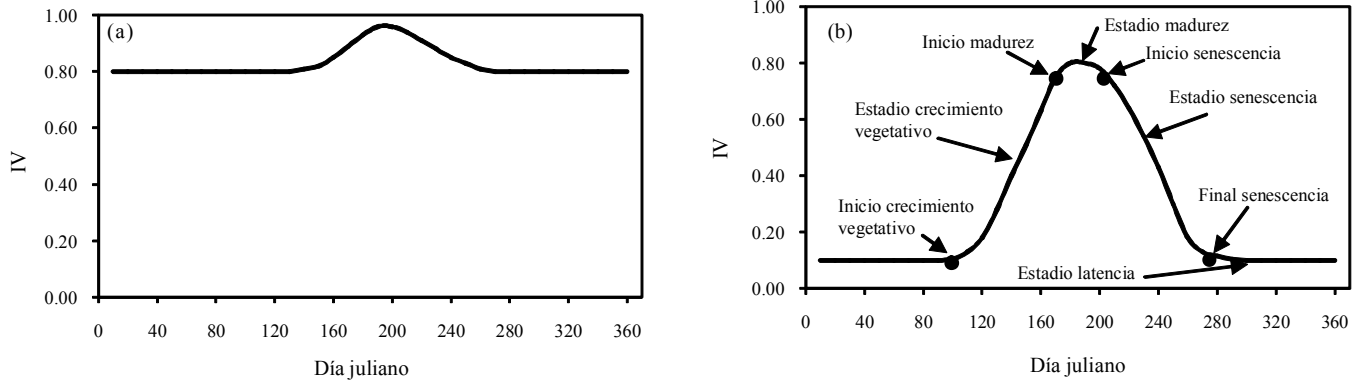


Figura 1. Patrones esquemáticos de la evolución temporal de un índice de vegetación en bosques: (a) perennes; (b) caducifolios. IV = índice de vegetación.

después de remover los ruidos espectrales y suavizar los datos (Zhang *et al.*, 2012; Atkinson *et al.*, 2012).

En el caso de bosques con diferentes niveles de caducidad del follaje o bosques mixtos, el patrón temporal es intermedio entre el bosque perenne y el caducifolio (Zhang *et al.*, 2006), lo que se caracteriza por la diferencia entre el IV máximo y mínimo. Este enfoque se utiliza para evaluar la caducidad de un bosque (Cuba *et al.*, 2013).

El patrón de la Figura 1b permite definir los umbrales y la duración de los diferentes estadios del crecimiento del follaje en función de la evolución temporal del IV (Zhang *et al.*, 2012).

Para entender los patrones espectrales de las bandas de R e IRC, en la Figura 2 se muestran simulaciones radiativas asociadas al crecimiento de un cultivo (medio

homogéneo o turbio) usando como fondo dos tipos de suelos, con dos niveles de humedad (seco y húmedo) cada uno (Paz *et al.*, 2005), donde se observa que las curvas iso-IAF ($IRC = a_0 + b_0R$, donde a_0 y b_0 dependen del índice de área foliar o IAF) van desde la línea del suelo o $IAF = 0$ ($IRC = a_s + b_sR$, donde a_s y b_s caracterizan al suelo) hasta degenerar en un punto (R_∞ , IRC_∞) de saturación de las bandas, que representa un medio ópticamente denso o de reflectancias en el infinito. El IRC_{R_∞} representa el valor del IRC asociado a R_∞ , que es la reflectancia de saturación del R, que alcanza valores para IAF alrededor de 2 (tasa máxima de eficiencia fotosintética). Si se deja fijo al suelo (propiedades ópticas) se obtiene una curva iso-suelo (Figura 2).

Considerando solo el crecimiento vegetativo, en la Figura 2, se observa que la banda del R disminuye y la del IRC se incrementa al crecer el cultivo, lo que denota patrones contrarios entre sí. Para suelos muy oscuros (que no se muestran en la Figura 2), la banda R tiende a cero al inicio del cultivo y se incrementa al crecer la vegetación (Shabanov *et al.*, 2002), de forma que R e IRC muestran patrones similares entre sí.

Al considerar la evolución temporal de la vegetación, las condiciones de iluminación solar cambian, lo que introduce efectos que distorsionan los valores del R e IRC. Para tomar en cuenta este efecto es conveniente estandarizar estas condiciones, mediante un modelo simplificado de geometría de iluminación-visión (Bolaños y Paz, 2010):

$$\chi = 90 - \theta v + \theta s$$

$$Rn = \ln(R) \cos(\chi)$$

$$\chi = 90 - gRn$$

(1)

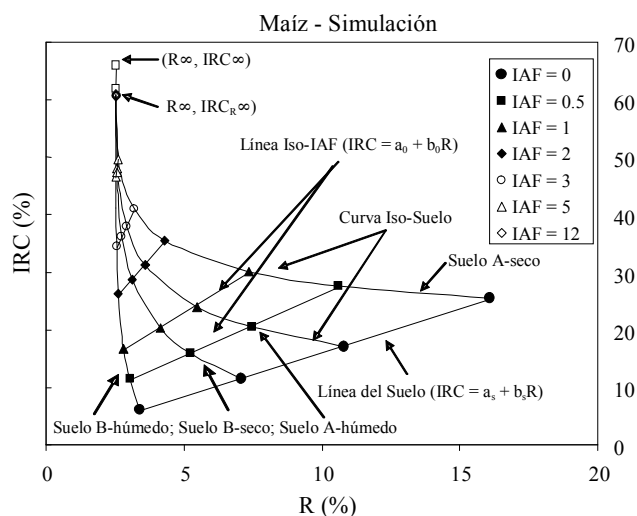


Figura 2. Simulaciones radiativas del crecimiento de un cultivo, que muestra los patrones espectrales asociados al espacio del R-IRC.

donde: θ_v es el ángulo cenital de visión, θ_s el ángulo cenital de iluminación solar, χ es una variable angular de posición, R es la reflectancia de cualquier banda, R_n es la reflectancia normalizada por posición angular y efecto de escala (función logaritmo natural) y g es un parámetro que define la geometría sol-sensor.

La ventaja del modelo es que solo tiene un parámetro, el cual puede estimarse con un solo dato de medición. En lo siguiente solo se considerarán reflectancias normalizadas y estandarizadas a la geometría $\theta_v = 0^\circ$ y $\theta_s = 30^\circ$, de tal forma que todas las mediciones espectrales tienen una base común de observación. La inversión del modelo de geometría sol-sensor, relaciones (1), para estimar reflectancias no normalizadas introduce errores (Bolaños y Paz, 2010), por lo que no es necesaria en términos de su uso en índices de vegetación y evitándose así la propagación de errores.

Las mismas simulaciones radiativas se muestran en la Figura 2 y en la Figura 3, pero normalizadas y estandarizadas, donde las reflectancias se multiplicaron por -1 para hacerlas positivas.

Se observa en la Figura 3 que las curvas iso-suelo reducen su curvatura, lo que aproxima mejores patrones más o menos lineales o exponenciales. Así, se puede usar un índice de vegetación que considere las curvas iso-suelo para el análisis de los patrones temporales de la vegetación (Paz *et al.*, 2011), pero en términos de reflectancias normalizadas y estandarizadas:

$$IVIS_n = -\ln\left(\frac{dIRC_{n\infty} - dIRC_n}{dIRC_{n\infty} - dIRC_{ns}}\right) \tag{2}$$

$$dIRC_n = IRC_n - (a_{ns} + b_{ns}R_n)$$

En lo siguiente se utilizarán los parámetros $dIRC_{ns} = 0$, $dIRC_{n\infty} = 3$, $a_{ns} = 0$ y $b_{ns} = 0.8$ para los análisis de diferentes experimentos.

La Figura 4 muestra la evolución temporal de R_n e IRC_n , así como del $IVIS_n$, para el caso de un cultivo de frijol, cuyo experimento esta descrito en Reyes *et al.* (2011).

Las reflectancias R_n e IRC_n (Figura 4) tienen patrones contrarios en la etapa vegetativa y de senescencia, por lo que el $IVIS_n$ presenta un patrón de crecimiento y decrecimiento, similar al de la Figura 1b. El patrón de la Figura 4, de evolución temporal de reflectancias, normalizadas o no, es similar al que se observa para el caso de bosques en general (Nilson *et al.*, 2012).

El patrón temporal que se discute en la Figura 4 no muestra, aparentemente, la aparición de floración (etapa reproductiva). Para revisar esta situación es conveniente analizar un experimento de maíz, donde el suelo debajo del cultivo se cambió mediante el uso de charolas deslizantes (Bausch, 1993). Las reflectancias se midieron hasta el punto de máximo índice de área foliar solo en la etapa vegetativa y reproductiva. La Figura 5

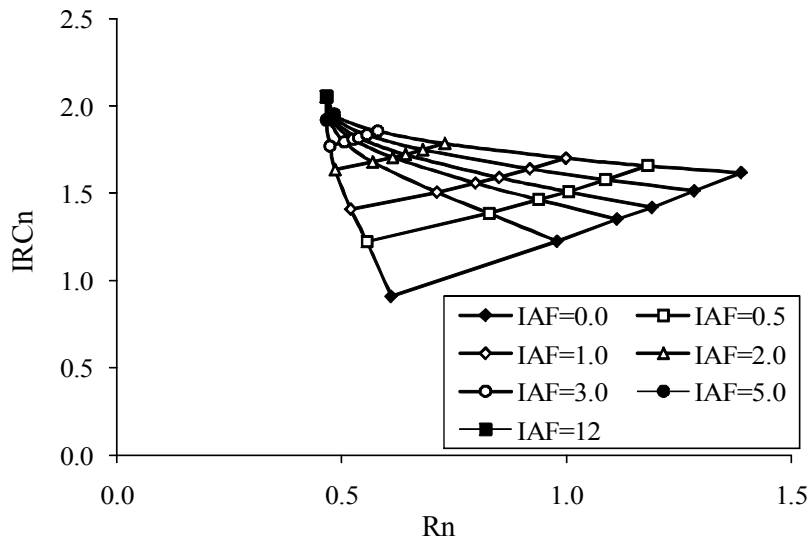


Figura 3. Simulaciones radiativas del crecimiento de un cultivo, que muestran los patrones espectrales asociados al espacio del R_n - IRC_n estandarizado por geometría sol-sensor. IAF = índice de área foliar.

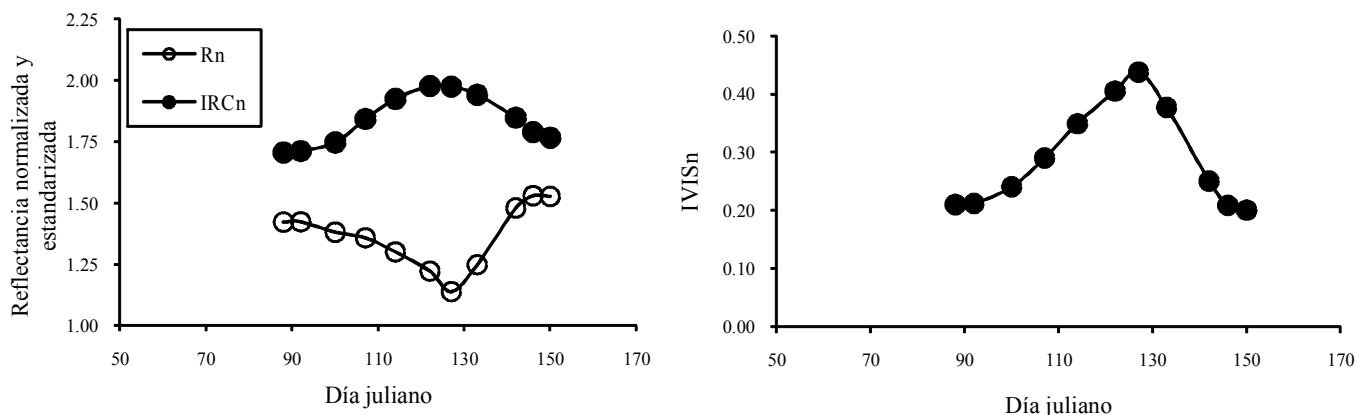


Figura 4. Evolución temporal de Rn, IRCn e IVISn para el caso de un cultivo de frijol.

muestra la evolución de Rn, IRCn e IVISn para el caso de un suelo relativamente oscuro (reflectancia del rojo del 12 %). Se observa en esta figura que la banda Rn muestra un cambio de la etapa vegetativa a la reproductiva con un incremento en su valor, a diferencia del crecimiento vegetativo que se caracteriza por la disminución de Rn (Figura 4 y 5). El índice IVISn muestra el efecto de la etapa reproductiva con una disminución de su valor.

Para el mismo experimento de la Figura 5, pero para el caso de un suelo claro (reflectancia del rojo del 30%), la Figura 6 muestra la evolución temporal de Rn, IRCn e IVISn. Se observa el efecto del suelo (propiedades ópticas) en la etapa reproductiva donde Rn e IVISn permanecen constantes.

Derivado de la discusión anterior, se puede decir que la etapa reproductiva en un cultivo puede observarse o no (queda enmascarada), lo que depende de

la intensidad y propiedades ópticas del fondo del cultivo. Este efecto de floración o etapa reproductiva puede conducir a errores en la estimación de la biomasa aérea cuando se usan sensores remotos (Shen *et al.*, 2010).

Floración

En el caso de la vegetación herbácea se conocen los siguientes estadios asociados a la etapa de floración (Lang, 1965): (a) inducción floral (transición del desarrollo vegetativo al reproductivo en el meristema apical); (b) diferenciación temprana de las yemas florales; (c) desarrollo de yemas florales; y (d) antesis (apertura de las yemas florales y despliegue de flores). Para la vegetación arbórea la fenología es más compleja, pero se distinguen dos mecanismos generales que definen la transición del meristema vegetativo a la iniciación floral: (a) el meristema vegetativo cambia a reproductivo

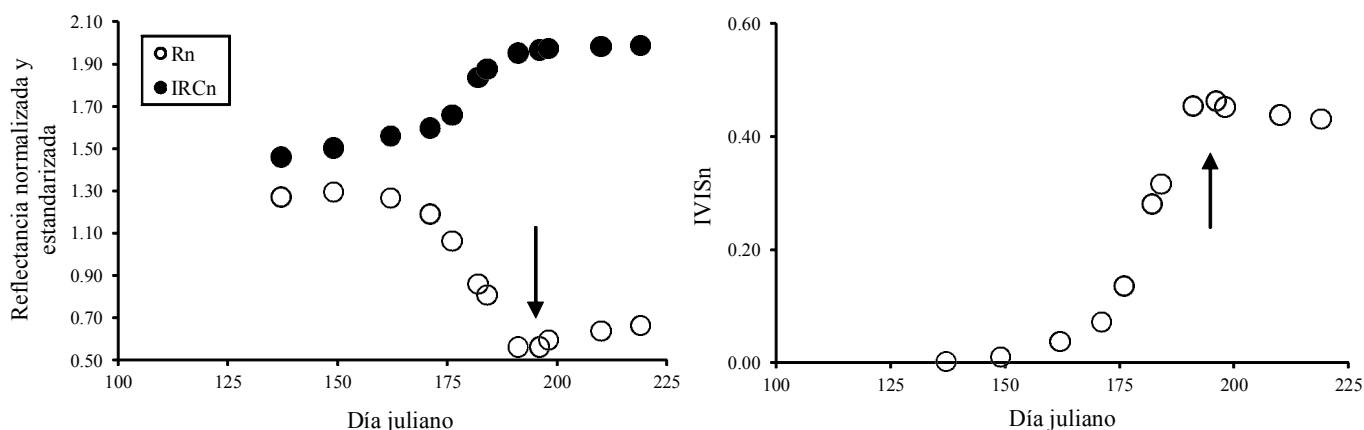


Figura 5. Evolución temporal de Rn, IRCn e IVISn para el caso de un cultivo de maíz, con suelo relativamente oscuro, que muestra el efecto de la etapa reproductiva.

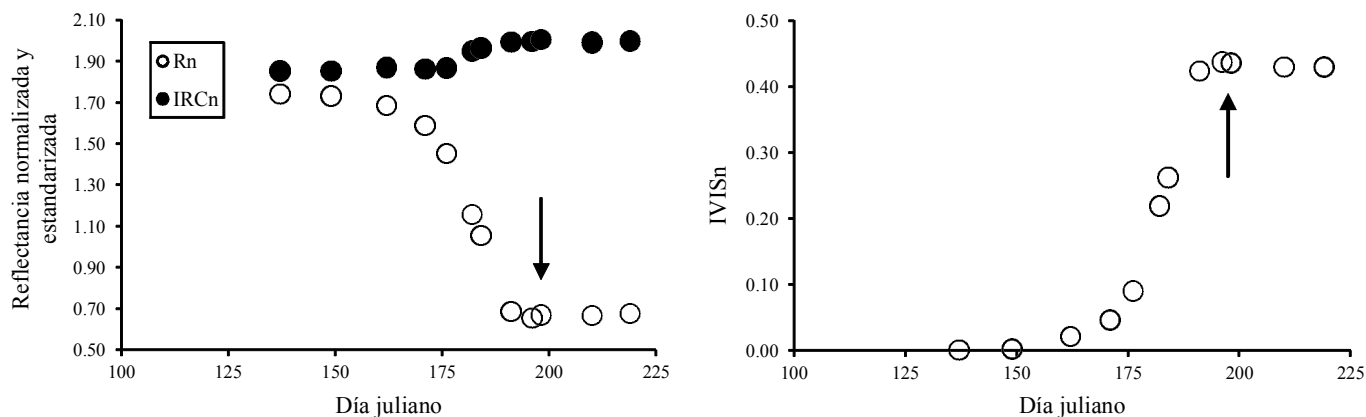


Figura 6. Evolución temporal de Rn, IRCn e IVISn para el caso de un cultivo de maíz, con suelo claro, que muestra el efecto de la etapa reproductiva.

formando el eje de floración y (b) el meristema vegetativo permanece con la producción de flores lateralmente (Halle *et al.*, 1978). Los factores que controlan la inducción floral en los árboles son diferentes de los de la antesis (Borchert, 1983), por lo que es importante diferenciarlos. La inducción floral generalmente está controlada por factores endógenos y, parcialmente, por ambientales (Borchert, 1983; Rathcke y Lacey, 1985).

En bosques tropicales caducifolios, en alguna medida, los eventos de precipitación en el periodo seco generalmente se asocian a la aparición de la floración (Opler *et al.*, 1976; Heideman, 1989; Borchert, 1983 y 1996; Valdez-Hernández *et al.*, 2010). El control de la floración (parcialmente) por factores climáticos permite utilizar modelos fenológicos con relativo éxito (Li y Zhou, 2012; y modelos revisados en este trabajo). No obstante esta situación, la información meteorológica en México es escasa y desactualizada para utilizar esta estrategia para caracterizar la fenología de la vegetación natural.

En los bosques tropicales la floración se presenta bajo dos mecanismos: (a) floración (expansión de yemas florales) acompañada de expansión de nuevas hojas y (b) floración sin hojas (expansión de yemas florales) (Borchert *et al.*, 2004; Valdez-Hernández *et al.*, 2010).

En bosques tropicales con caducidad del follaje, la floración suele presentarse posterior o al término de la caída de hojas en la primavera (Borchert, 1996; Lobo *et al.*, 2003; Valdez-Hernández *et al.*, 2010), aunque también puede haber presencia de nuevo follaje y su expansión (Bullock y Solis-Magallanes, 1990; Kikim y Yadava, 2001). En bosques tropicales caducifolios generalmente se presenta un evento de floración y en los perennes dos o tres (Valdez-Hernández *et al.*, 2010).

En términos de los estratos de los bosques, la fenología del estrato superior e inferior casi siempre están sincronizadas (Kikim y Yadava, 2001), por lo que la vegetación herbácea y arbustiva presentan patrones fenológicos similares a la vegetación arbórea, la cual tiene una sincronización entre especies para la presencia colectiva de eventos de floración (Opler *et al.*, 1976; Heideman, 1989; Bullock y Solis-Magallanes, 1990; Borchert *et al.*, 2004) que pueden asociarse con la coevolución de las plantas y sus polinizadores (Rathcke y Lacey, 1985).

La discusión anterior, en términos espectrales, plantea que la floración acompañada por la expansión del follaje puede definirse por un incremento del IV (incremento del follaje) y después una reducción con la apertura de la flores; aunque estos eventos pueden, o no, estar sincronizados. En el caso de floración sin expansión del follaje, el incremento de tejido fotosintético (yemas y botones florales) implica un incremento (de menor magnitud al del follaje) del índice de vegetación (no necesariamente detectable con sensores remotos) y, posteriormente, una disminución de éste debido a la aparición de flores. Estos mecanismos de incremento y decremento del IV se asocian con la vegetación caducifolia, pero no necesariamente pueden aplicarse a la vegetación perenne, en donde la reflectancia del fondo verde predomina sobre la de la floración, a menos que su intensidad modifique el patrón de color.

El uso de cámaras digitales para detectar los eventos de floración muestra que la banda del rojo se incrementa (inicio de la floración a su pico) y después se reduce (pico de la floración a final) (Crimmins y Crimmins, 2008; Richardson *et al.*, 2009). Desafortunadamente,

las cámaras digitales normales no tienen filtros para observar el infrarrojo cercano, por lo que su información es limitada. En experimentos de floración en vegetación herbácea (número de flores), se observa que con el incremento de la floración las bandas del R e IRC crecen simultáneamente (Hunt y Williams, 2006; Chen *et al.*, 2009). En el caso de bosques, Nilson *et al.* (2012) muestran que la banda del R se incrementa y disminuye en la ocurrencia de la floración, en forma similar que para el caso de la floración en vegetación herbácea. La banda del IRC, con ruido, muestra un patrón similar, pero no sincronizado, aparentemente, con la banda del R. Algo similar se observa en vegetación herbácea (Hunt y Williams, 2006).

De la revisión de los patrones temporales y espectrales de la vegetación, se concluye que el conocimiento asociado a la floración es todavía reducido, por lo que resulta importante generar una aproximación experimental que contribuya a definir los alcances y limitaciones de uso de índices de vegetación para su caracterización de esta etapa fenológica; además de lo que se discutió previamente, en el sentido de que la floración en presencia del crecimiento del follaje puede producir un cambio en los IV.

El objetivo principal de este trabajo fue caracterizar la etapa reproductiva de los bosques tropicales caducifolios, a partir de datos espectrales de un experimento simulado de componentes de la vegetación, a fin de sentar bases para el desarrollo de modelos fenológicos que puedan calibrarse con información de sensores remotos. Para ello se analizaron los patrones espectrales de diferentes tipos de vegetación de modo que pudiera caracterizarse en forma apropiada, así como definir los alcances y límites del uso de la información espectral. Tomando como referencia las bandas espectrales que usan la mayoría de los sensores remotos en satélites, en este trabajo se decidió considerar solo las bandas del rojo (R) e infrarrojo cercano (IRC), que se usan en los índices espectrales de la vegetación para caracterizar el crecimiento y senescencia de las plantas, dado su alto contraste en estos tipos de cobertura.

MATERIALES Y MÉTODOS

Con el objetivo de aproximar el evento de floración en un bosque tropical caducifolio o vegetación caducifolia en general, se desarrolló un experimento usando

el enfoque propuesto por Ge *et al.* (2006), donde la vegetación y sus estadios fenológicos se generan a partir de componentes (por ejemplo: tallos, yemas, flores abiertas y postflores) al cambiar sus proporciones. Para el experimento se usaron flores de plantas ornamentales del género *Chrysanthemum* sp. de tres colores (blancas, amarillas y lilas) en diferentes etapas fenológicas (fácilmente de conseguir en la región), así como follaje verde de algunas otras especies, ramas senescentes y frutos de algunos arbustos. Para las mediciones de reflectancias se utilizó un radiómetro con resolución espectral de 5 bandas (Azul, Verde, Rojo, Infrarrojo Cercano e Infrarrojo Medio; similares a las bandas del sensor TM del satélite Landsat), un *datalogger* para el almacenamiento de datos y una cámara fotográfica digital. Las mediciones se realizaron a una altura de 120 cm, por lo que el área de visión circular tuvo un diámetro de 60 cm.

Los estadios simulados se muestran en el Cuadro 1, en donde los estadios del 1 al 3 corresponden a la pre-floración, los estadios del 4 al 6.66 a la floración y los 7 y 8, a la post floración. Al usar la escala fenológica BBCH (Meier, 1977) se generó una escala que aproxima la evolución temporal de los estadios simulados, particularmente en el caso del periodo del pico de la floración, hasta la caída total de las flores (del 4 al 6.66).

Los estadios de pre floración se muestran en la Figura 7 y en la Figura 8 los estadios asociados a la floración. Se observa que los escenarios simulados son aproximaciones gruesas a los eventos fenológicos de la vegetación caducifolia, pero capturan la esencia del proceso. El experimento se diseñó para generar un análisis cualitativo de la evolución de las reflectancias y el IV para que, en conjunto con la evidencia experimental previa, fuera posible desarrollar un modelo fenológico espectral y definir los alcances y limitaciones en el uso de los índices de vegetación.

Los estadios pre floración fueron los mismos para todos los tipos de flores: blanca, amarilla, lila y mezcla de todas. Los estadios post floración también fueron los mismos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 9 se muestra el R_n , IRC_n e $IVIS_n$ para los diferentes tipos de flores en los estadios de la floración (4 al 6.66), los cuales se enumeraron por conveniencia

Cuadro 1. Estadios simulados en los experimentos.

Estadio	Descripción
1	Ramas y estratos bajos verdes, paisaje seco
2	Aparecen las yemas florales, ramas parcialmente verdes en las puntas, estratos bajos verdes, paisaje semiseco
3	Aparecen los botones florales, ramas verdes, estratos bajos verdes, paisaje parcialmente verde
4	Los sépalos dejan ver los pétalos, ramas verdes, estratos bajos verdes, paisaje parcialmente verde con tonos tenues de pre-floración
5	Aparecen las primeras flores, ramas verdes, estratos bajos verdes, paisaje parcialmente verde con tonos moderados de floración
6	Plena floración, ramas verdes, estratos bajos verdes, paisaje dominado por el color de la flor con tonos escasos de verde
6.33	Caída parcial de flores, ramas verdes, estratos bajos verdes, paisaje codominado por el tono de la floración y tonos secos de la vegetación; tonos verdes dispersos y escasos
6.66	Caída plena de flores, ramas verdes, estratos bajos verdes, paisaje semiseco, fondo con tonos de la floración
7	Paisaje codominante tonos verdes y secos
8	Paisaje verde



Estadio 1



Estadio 2



Estadio 3

Figura 7. Estadios pre floración simulados en los experimentos.

Estadio 4



Estadio 5



Estadio 6



Estadio 6.33



Estadio 6.66

Figura 8. Estadios de la floración simulados en los experimentos.

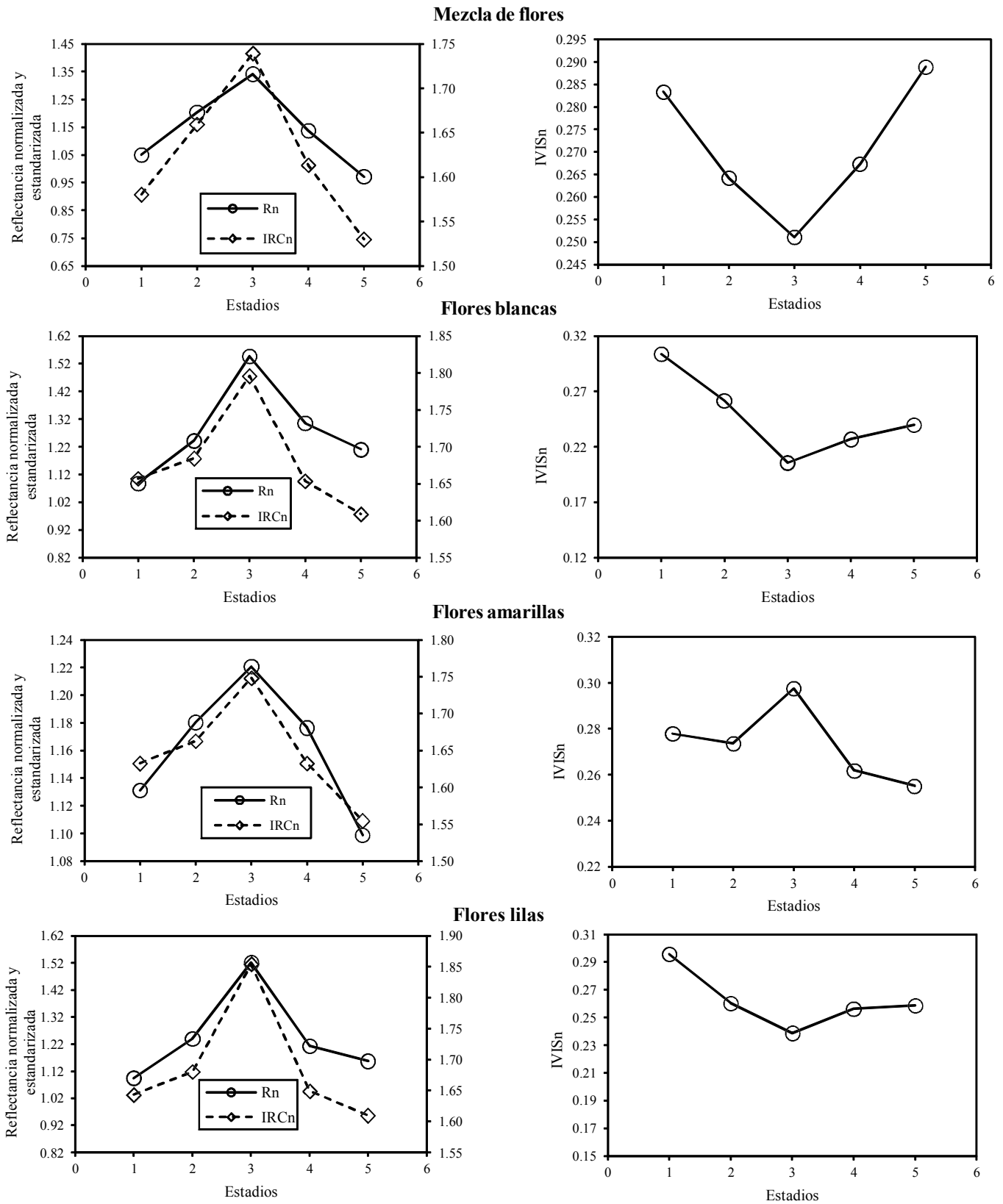


Figura 9. Estadios de la floración donde estadio 1 = inicio, 3 = pico y 5 = final. Rn e IRCn son reflectancias normalizadas y estandarizadas del rojo e infrarrojo respectivamente, que toman valores de 0.8 a 2.30 para ángulos de iluminación de >0° hasta 30° y pueden alcanzar valores de 3.98 a 60° de iluminación.

del 1 (inicio o estadio 4) al 5 (final o estadio 6.66), con 3 en el pico (estadio 6).

Con relación a la banda del rojo e infrarrojo cercano, los patrones muestran que ambas bandas crecen y decrecen en forma simultánea, tal como lo observaron otros autores (Crimmins y Crimmins, 2008; Richardson *et al.*, 2009; Nilson *et al.*, 2012). El IVISn decrece hasta el pico de la floración y después crece hasta el término de la misma; aunque en algunos casos este tipo de crecimiento no se observa y es contrario a lo esperado (flores amarillas; Shen *et al.*, 2009).

Los estadios pre floración, floración y post floración en términos del IVISn se muestran en la Figura 10.

Los resultados del IVISn para los experimentos, muestran que la floración es detectable si se presenta

un incremento de tejido fotosintético (pre floración) y, que el pico de la floración está asociado, generalmente, al valor más bajo del índice, antes del inicio del crecimiento del follaje (post floración). El uso de IV desarrollados para analizar el crecimiento de las hojas (R_n e IRC_n tienen patrones contrarios) tiene limitaciones intrínsecas con relación a la floración (R_n e IRC_n tienen patrones similares). Un modelo aproximado de la fenología completa de los bosques tropicales se muestra en la Figura 11, en donde no es posible discriminar el término de la floración y el inicio del follaje.

El patrón de la floración que se muestra en la Figura 11 solo se detecta cuando la floración es intensa y sincronizada, además de que el fondo de la vegetación no es tan claro para enmascarar el color de las flores y sus mezclas.

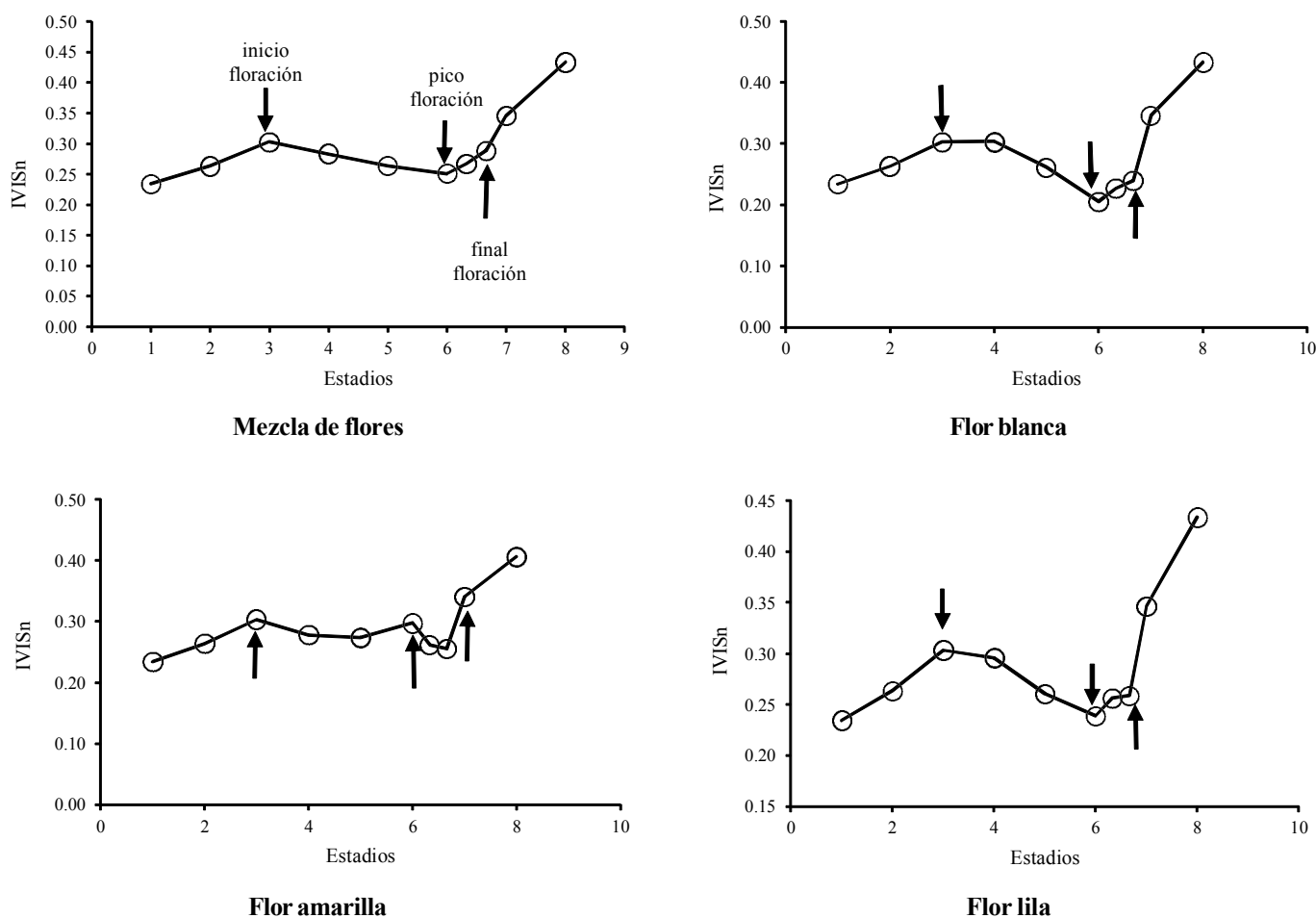


Figura 10. Índice IVISn para los diferentes tipos de flores, en los estadios de pre-floración, floración y post floración.

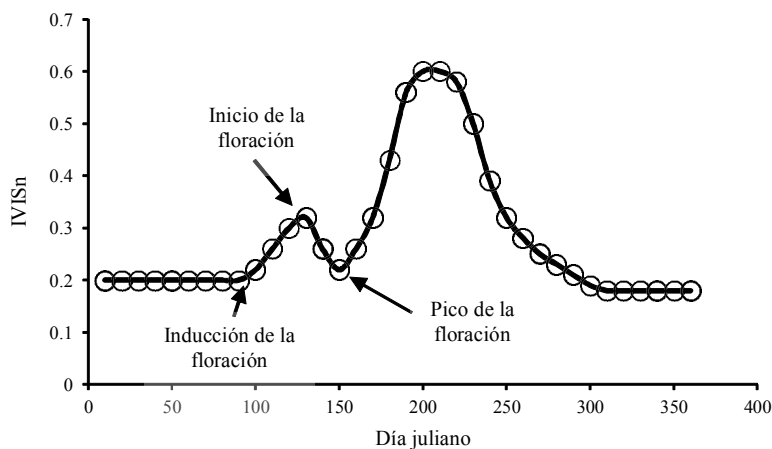


Figura 11. Esquemización de los estadios de la floración en un bosque tropical caducifolio.

CONCLUSIONES

- La revisión y análisis de los patrones temporales de las bandas del rojo e infrarrojo cercano, normalizadas y estandarizadas por efecto de la geometría sol-sensor, mostró tendencias contrarias (una banda se incrementa y la otra se reduce) que permiten que los índices de vegetación generen crecimiento y decrecimiento (senescencia) del follaje. Cuando se presenta un cambio de la etapa vegetativa a la reproductiva en un cultivo agrícola, por ejemplo, los índices de vegetación detectan este estadio fenológico como contrario al patrón vegetativo o sin cambio, lo que depende del tipo de fondo debajo del cultivo.

- En el caso de la vegetación arbórea caducifolia, la revisión experimental muestra que la floración se asocia a un incremento y decremento de la banda del rojo. El análisis de los resultados del experimento de este trabajo, para simular los estadios pre floración, floración y post floración, muestran que en la floración las bandas del rojo y del infrarrojo cercano tienen tendencias similares (crecen o decrecen al mismo tiempo), por lo que los índices de la vegetación responden con variaciones contrarias y pequeñas, en relación al follaje. Bajo la condición de un incremento del tejido fotosintético en la pre floración, es posible desarrollar un modelo fenológico que estime el inicio de la inducción floral, el inicio de la floración y su pico, aunque el término de la floración resulta difícil de detectar, cuando se enmascara por el inicio del crecimiento vegetativo del follaje.

- Este trabajo muestra que es necesario desarrollar un nuevo índice de vegetación que detecte la floración, al considerar que las bandas del rojo e infrarrojo cercano

tienen tendencias similares, contrario a los patrones de crecimiento del follaje para los que los índices fueron desarrollados.

LITERATURA CITADA

- Atkinson, P. M., C. Jeganathan, J. Dash, and C. Atzberger. 2012. Inter-comparison of four models for smoothing satellite sensor time-series data to estimate vegetation phenology. *Remote Sens. Environ.* 123: 400-417.
- Bausch, W. C. 1993. Soil background effects on reflectance based crop coefficients for corn. *Remote Sens. Environ.* 46: 213-222.
- Bolaños, M. y F. Paz. 2010. Modelación general de los efectos de la geometría de iluminación-visión en la reflectancia de pastizales. *Rev. Mex. Cienc. Pec.* 1: 349-361.
- Borchert, R. 1983. Phenology and control of flowering in tropical trees. *Biotropica* 15: 81-89.
- Borchert, R. 1996. Phenology and flowering periodicity of neotropical dry forest species: Evidence from herbarium collections. *J. Trop. Ecol.* 12: 65-80.
- Borchert, R., S. A. Meyer, R. S. Felger, and L. Porter-Bolland. 2004. Environmental control of flowering periodicity in Costa Rican and Mexican tropical dry forests. *Global Ecol. Biogeog.* 13: 409-425.
- Bullock, S. H. and J. A. Solis-Magallanes. 1990. Phenology of canopy trees of a tropical deciduous forest in Mexico. *Biotropica* 22: 22-35.
- Chen, J., M. Shen, X. Zhu, and Y. Tang. 2009. Indicator of flower status derived from in situ hyperspectral measurement in an alpine meadow on the Tibetan Plateau. *Ecol. Indic.* 9: 818-823.
- Crimmins, M. A. and T. M. Crimmins. 2008. Monitoring plant phenology using digital repeat photography. *Environ. Manage.* 41: 949-958.
- Cuba, N., J. Rogan, Z. Christman, C. A. Williams, L. C. Schneider, D. Lawrence, and M. Millones. 2013. Modelling dry season deciduousness in Mexican Yucatán forest using MODIS EVI data (2000-2011). *GISci. Remote Sens.* 50: 26-49. DOI: 10.1080/15481603.2013.778559.

- de Jong, B., C. Anaya, O. Masera, M. Olguín, F. Paz, J. Etchevers, R. Martínez, G. Guerrero, and C. Balbontín. 2010. Greenhouse gas emissions between 1993 and 2002 from land-use change and forestry in Mexico. *For. Ecol. Manage.* 260: 1689-1701.
- Fisher, J. I., J. F. Mustard, and M. A. Vadeboncoeur. 2006. Green leaf phenology at Landsat resolution: scaling from the field to the satellite. *Remote Sens. Environ.* 100: 265-279.
- Ge, S., J. Everitt, R. Carruthers, P. Gong, and G. Anderson. 2006. Hyperspectral characteristics of canopy components and structure for phenological assessment of an invasive weed. *Environ. Monitor. Assess.* 120: 109-126.
- Halle, F., R. A. A. Oldeman, and P. B. Tomlinson. 1978. *Tropical trees and forests an architectural analysis.* Springer Verlag. Berlin.
- Heideman, P. D. 1989. Temporal and spatial variation in the phenology of flowering and fruiting in a tropical rainforest. *J. Ecol.* 77: 1059-1079.
- Hunt, E. R. and A. E. P. Williams. 2006. Detection of flowering leafy spurge with satellite multispectral imagery. *Rangel. Ecol. Manage.* 59: 494-499.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2012. *La apicultura de la Península de Yucatán: Censo agropecuario 2007.* Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, Ags., México.
- Jiang, Z., A. R. Huete, K. Didan, and T. Miura. 2008. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sens. Environ.* 112: 3833-3845.
- Kikim, A. and P. S. Yadava. 2001. Phenology of tree species in subtropical forests of Manipur in north eastern India. *Trop. Ecol.* 42: 269-296.
- Kramer, K., I. Leinonen, and D. Loustau. 2000. The importance of phenology for the evaluation of impact of climate change on growth of boreal, temperate and Mediterranean forests ecosystems: An overview. *Int. J. Biometeorol.* 44: 67-75.
- Lang, A. 1965. Physiology of flower initiation. pp. 1380-1536. *In:* W. Ruhland (ed.). *Differentiation and development.* Encyclopedia Plant Physiology 15. Springer. Berlin.
- Li, R. P. and G. S. Zhou. 2012. A temperature-precipitation based leafing model and its application in northeast China. *PlosONE* 7(4):e33192. doi 10.1371/journal.pone.0033192.
- Liu, H. Q. and A. Huete. 1995. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 33: 457-465.
- Lobo, J. A., M. Quesada, K. E. Stoner, E. J. Fuchs, Y. Herrerías-Diego, J. Rojas, and G. Saborío. 2003. Factors affecting phenological patterns in *bombacaceous* trees in seasonal forests in Costa Rica and Mexico. *Am. J. Bot.* 90: 1054-1063.
- Meier, U. 1997. BBCH-monograph. Growth stages of plants. Entwicklungsstadien von Pflanzen. Estadios de las plantas. Développement des plantes. Blackwell Wissenschafts-Verlag. Berlin, Germany/Vienna, Austria.
- Nilson, T., M. Rautiainen, J. Pisek, and U. Peterson. 2012. Seasonal reflectance courses of forests. New advances and contributions to forestry research. pp. 33-58. *In:* A. A. Oteng-Amoako (ed.). ISBN 978-953-51-0529-9. InTech DOI: 10.5772/34962.
- Ochoa-Gaona, S. y V. Cruz-Arias. 2002. La distribución y fenología de la flora arbórea del estado de Tabasco con base a la información de herbario. *Univer. Cienc.* 18: 114-127.
- Opler, P. A., G. W. Frankie, and H. G. Baker. 1976. Rainfall as a factor in the release, timing and synchronization of anthesis by tropical trees and shrubs. *J. Biogeog.* 3: 231-236.
- Parihar, J. S., S. Goroshi, R. P. Singh, N. S. R. Krishnayya, M. B. Sirsayya, A. Kumar, L. S. Rawat, and A. Sonakia. 2013. Observation of forest phenology using field-based digital photography and satellite data. *Curr. Sci.* 105: 1740-1747.
- Parry, M. L., O. F. Canziani, J. P. Paluyimof, P. J. van der Linden, and C. E. Hanson. 2007. *Climate change 2007: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II. Fourth Assessment Report of the Intergovernment Panel on Climate Change.* Intergovernment Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Paz, F., E. Palacios, E. Mejía, M. Martínez y L. A. Palacios. 2005. Análisis de los espacios espectrales de la reflectividad del follaje de los cultivos. *Agrociencia* 39: 293-301.
- Paz, F., M. Reyes y E. Medrano. 2011. Diseño de índices espectrales de la vegetación usando curvas iso-suelo. *Agrociencia* 45: 121-134.
- Peñuelas, J. and I. Fillela. 2001. Phenology-responses to a warming world. *Science* 294: 793-794.
- Post, E. S., C. Pedersen, C. C. Wilmers, and M. C. Forchhammer. 2008. Phenological sequences reveal aggregate life history response to climate warming. *Ecology* 89: 363-370.
- Primack, R. B. 1985. Longevity of individual flowers. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 16: 15-37.
- Rathcke, B. and E. P. Lacey. 1985. Phenological patterns of terrestrial plants. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 16: 179-214.
- Reyes, M., F. Paz, M. Casiano, F. Pascual, M. I. Marín y E. Rubiños. 2011. Caracterización del efecto de estrés usando índices espectrales de la vegetación para la estimación de variables relacionadas con la biomasa aérea. *Agrociencia* 45: 221-233.
- Richardson, A. D., B. H. Braswell, D. Y. Hollinger, J. P. Jenkins, and S. V. Ollinger. 2009. Near surface remote sensing of spatial and temporal variation in canopy phenology. *Ecol. Applic.* 19: 1417-1428.
- Rouse, J. W., R. H. Haas, J. A. Schell, D. W. Deering, and J. C. Harlan. 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation (green wave effect) of natural vegetation, NASA/GSFC, Type III, Final Report. Greenbelt, MD, USA.
- Running, S. W. and R. R. Nemani. 1991. Regional hydrologic and carbon balance responses of forests resulting from potential climate change. *Clim. Change* 19: 349-368.
- Schwartz, M. D., R. Ahas, and A. Aasa. 2006. Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere. *Global Change Biol.* 12: 343-351.
- Shabanov, N. V., L. Zhou, Y. Knyazikhin, R. B. Myneni, and C. J. Tucker. 2002. Analysis of interannual changes in northern vegetation activity observed in AVHRR data from 1981 to 1994. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 40: 115-130.
- Shen, M., J. Chen, X. Zhur, and Y. Tang. 2009. Yellow flowers can decrease NDVI and EVI values: Evidence from a field experiment in an alpine meadow. *Can. J. Remote Sens.* 35: 99-106.
- Shen, M., J. Chen, X. Zhu, Y. Tang, and X. Chen. 2010. Do flowers affect biomass estimate accuracy from NDVI and EVI? *Int. J. Remote Sens.* 31: 2139-2149.

- Stöckli, R. and P. L. Vidale. 2004. European plant phenology and climate as seen in a 20-year AVHRR land-surface parameter dataset. *Int. J. Remote Sensing* 25: 3303-3330.
- Valdez-Hernández, M., J. L. Andrade, P. C. Jackson, and M. Rebolledo-Vieyra. 2010. Phenology of five tree species of a tropical dry forest in Yucatan, Mexico: effects of environmental and physiological factors. *Plant Soil* 329: 155-171.
- White, M. A., S. W. Running, and P. E. Thornton. 1999. The impact of growing-season length variability on carbon assimilation and evapotranspiration over 88 years in the eastern US deciduous forest. *Int. J. Biometeorol.* 42: 139-145.
- Wilson, K. B. and D. D. Baldocchi. 2000. Seasonal and interannual variability of energy fluxes over a broadleaved temperate deciduous forest in North America. *Agric. Meteorol.* 100: 1-18.
- Zhang, P. and B. Anderson. 2004. Climate-related vegetation characteristics derived from moderate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) leaf area index and normalized difference vegetation index. *J. Geophys. Res.* doi:10.1029/2004JD004720.
- Zhang, X., M. A. Friedl, and C. B. Schaaf. 2006. Global vegetation phenology from moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): Evaluation of global patterns and comparison with in situ measurements. *J. Geophys. Res.* doi:10.1029/2006J6000217.
- Zhang, X., M. A. Friedl, B. Tan, M. D. Goldberg, and Y. Yu. 2012. Long-term detection of global vegetation phenology from satellite instruments. pp. 297-320. *In: X. Zhang (ed.). Phenology and climate change. Chapter 16. ISBN 978-953-51-0336-3. InTech* doi:10.5772/39197.